



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**APLIKACE ČEDIČOVÝCH VLÁKEN
V CEMENTOVÝCH KOMPOZITECH**

USABILITY OF BASAL FIBRES IN CEMENT COMPOSITES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristína Kolková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Kristína Kolková
Název	Aplikace čedičových vláken v cementových kompozitech
Vedoucí práce	doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, A. Valenza. A review on basalt fibre and its composites. Composites Part B, 74, 2015, 74-94.

Cory High, Hatem M. Seliem, Adel El-Safty, Sami H. Rizkalla. Use of basalt fibers for concrete structures, Construction and Building Materials 96, 2015, 37–46.

Sruthi Jalsutram, Dipti Ranjan Sahoo, Vasant Matsagar. Experimental investigation of the mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete, Structural concrete, Journal of the fib, 2017, DOI: 10.1002/suco.201500216.

Bodnárová, L. Kompozitní materiály, učební opora VUT Brno, FAST, 2007.

Databáze internetových vědeckých časopisů Web of science, Scopus a další.

Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých sympozií.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Čedičová vlákna se v současné době dostávají do popředí zájmu jako nová perspektivní varianta rozptýlené výztuže pro aplikaci do cementových kompozitních materiálů.

Popište způsoby výroby čedičových vláken a jejich vlastnosti, včetně problematiky trvanlivosti čedičových vláken.

Proveďte rešerši informací o možnostech použití čedičových vláken v cementových kompozitech ve formě rozptýlené výztuže. Zaměřte se také na další možnosti zpracování čedičových vláken, jako jsou např. výztužené textilie a tkaniny. Uveďte konkrétní příklady použití čedičových vláken v cementových kompozitech, případně v kompozitech s polymerní maticí pro aplikace ve stavebnictví.

V praktické části bakalářské práce připravte cementový kompozit s čedičovými vlákny v dávce 3 kg/m³, ověřte rozmísení čedičových vláken v cementové matici, stanovte základní vlastnosti tohoto materiálu, především pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu a dokumentujte přítomnost čedičových vláken v kompozitu.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou použití čedičových vláken v cementových kompozitech a skládá se z rešeršní teoretické a experimentální části.

V teoretické části jsou popsány vlastnosti čedičových vláken, technologie výroby a chování čerstvého i ztvrdlého betonu při přidavku těchto vláken. Je uveden příklad použití čedičových vláken v praxi při rekonstrukci mostní konstrukce. Teoretická část se dále zabývá dalšími možnostmi využití výrobků z taveného čediče.

V experimentální části bylo ověřováno chování čerstvého a ztvrdlého betonu o přidavku 3, 10 a 20 kg.m⁻³ krátkých čedičových vláken. Tyto receptury byly následně porovnány s referenční směsí z prostého betonu. V čerstvém stavu byla stanovena a porovnána konzistence sednutím kužele, obsah vzduchu v čerstvém betonu a objemová hmotnost. Ve ztvrdlém stavu na vzorcích stáří 28 dnů byla stanovena a porovnána objemová hmotnost, pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku a pevnost v příčném tahu. Přítomnost vláken v cementovém kompozitu byla dokumentována pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu.

KLÍČOVÁ SLOVA

čedičová vlákna, beton vyztužený čedičovými vlákny, vláknobeton

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with issues of using basalt fibers in cement composites and it consists of a theoretical research and an experimental part.

In the theoretical research is a description of properties of basalt fibers, production technology and behavior of fresh and hard concrete with addition of basalt fibers. There is mentioned an example of application in practice of basalt fibers for a reconstruction of a bridge construction. The theoretical research also deals with more possibilities of use of products made from melted basalt.

In the experimental part was verified behavior of fresh and hard concrete with the addition 3, 10 and 20 kg.m⁻³ of short basalt fibers. These mixtures were compared with the reference mixture from plain concrete. There was determined the consistency in fresh condition by the slump test, the density and the air content. The flexure strength,

compressive strength and tensile strength were determined on hard concrete samples in age of 28 days. The presence of basalt fibers was detected by an electron scanning microscope.

KEYWORDS

basalt fibers, basalt fiber reinforced concrete, fiberconcrete

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Kristína Kolková *Aplikace čedičových vláken v cementových kompozitech*. Brno, 2018. 107 s., 113 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 7. 4. 2018

Kristína Kolková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucí mé bakalářské práce doc. Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za cenné rady, trpělivost a čas, které mi v průběhu studia věnovala.

Mé díky patří i mé rodině a příteli za podporu nejen v průběhu vypracovávání bakalářské práce, ale i po dobu celého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	17
2	TEORETICKÁ ČÁST	19
2.1	ČEDIČ.....	19
2.2	VÝROBKY Z TAVENÉHO ČEDIČE	19
2.2.1	ČEDIČOVÁ VLÁKNA	19
2.2.1.1	VLASTNOSTI.....	20
2.2.1.1.1	VZHLED	20
2.2.1.1.2	TEPLOTNÍ ODOLNOST A STABILITA	20
2.2.1.1.3	CHEMICKÁ ODOLNOST	21
2.2.1.1.4	FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	22
2.2.1.1.5	ZDRAVOTNÍ NEZÁVADNOST.....	26
2.2.1.2	TECHNOLOGIE VÝROBY	26
2.2.1.3	POUŽITÍ V CEMENTOVÝCH KOMPOZITECH	28
2.2.1.4	KONKRÉTNÍ APLIKACE V CEMENTOVÉM KOMPOZITU	29
2.2.1.4.1	SLOŽKY	29
2.2.1.4.2	MÍCHÁNÍ SMĚSI.....	30
2.2.1.4.3	ZKUŠEBNÍ METODY	30
2.2.1.4.4	KONZISTENCE SMĚSI	30
2.2.1.4.5	PEVNOST V TLAKU	30
2.2.1.4.6	PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU	32
2.2.1.4.7	PEVNOST V TAHU OHYBEM	32
2.2.1.4.8	ZÁVĚR.....	33
2.2.1.5	REKONSTRUKCE MOSTU ZA POMOCI BETONU VYZTUŽENÉHO ČEDIČOVÝMI VLÁKNY	34
2.2.1.5.1	STAV ZREKONSTRUOVANÉ KONSTRUKCE PO ROCE	38
2.2.2	DALŠÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ ČEDIČE VE STAVEBNICTVÍ.....	42
2.2.2.1	ČEDIČOVÉ VÝZTUŽNÉ TYČE	42
2.2.2.2	ČEDIČOVÉ KOMPOZITNÍ SÍŤ	45
2.2.2.3	ČEDIČOVÉ TKANINY	49
2.2.2.4	ČEDIČOVÉ SVAZKY – ROVINGY	50
2.2.2.5	ČEDIČOVÉ ROHOŽE Z NETKANÉ TEXTÍLIE	52
2.2.2.6	KROUCENÉ ČEDIČOVÉ PŘÍZE.....	52
2.2.2.7	ČEDIČOVÁ MINERÁLNÍ VLNA.....	53
2.2.2.8	ODPADNÍ ČEDIČOVÉ VLÁKNO.....	54

2.2.2.8.1	EKOLOGICKÁ VHODNOST ODPADNÍHO ČEDIČOVÉHO VLÁKNA	55
2.2.2.8.2	TECHNOLOGICKÁ VHODNOST ODPADNÍHO ČEDIČOVÉHO VLÁKNA	56
2.2.2.8.3	MOŽNOSTI VYUŽITÍ ODPADNÍHO ČEDIČOVÉHO VLÁKNA	57
2.3	VYBRANÍ DODAVATELÉ ČEDIČOVÝCH VLÁKEN V ČESKÉ REPUBLICE..	58
2.3.1	ORLIMEX CZ, s.r.o.	58
2.3.2	BASALTEX, a.s.	58
2.4	VYBRANÍ VÝROBCI ČEDIČOVÝCH VLÁKEN VE SVĚTĚ.....	59
3	CÍL PRÁCE.....	61
4	METODIKA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	63
4.1	TEORETICKÝ ROZBOR ŘEŠENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	63
4.2	NÁVRH PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK.....	63
4.2.1	SCHÉMA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	63
4.2.2	POPIS PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK.....	64
4.2.2.1	KONZISTENCE ČERSTVÉHO BETONU – ZKOUŠKA SEDNUTÍM64	
4.2.2.2	OBJEMOVÁ HMOTNOST ČERSTVÉHO BETONU	64
4.2.2.3	OBSAH VZDUCHU V ČERSTVÉM BETONU	64
4.2.2.4	OBJEMOVÁ HMOTNOST VE ZTVRDLÉM STAVU	65
4.2.2.5	PEVNOST V TAHU OHYBEM.....	65
4.2.2.6	PEVNOST V TLAKU	66
4.2.2.7	PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU.....	66
4.3	ZHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	67
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	69
5.1	CHARAKTERISTIKY VSTUPNÍCH SUROVIN.....	69
5.1.1	CEMENT	69
5.1.2	KAMENIVO	70
5.1.3	VODA.....	70
5.1.4	SUPERPLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADA	70
5.1.5	ČEDIČOVÁ VLÁKNA	70
5.2	RECEPTURY	72
5.3	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A JEJICH OŠETŘOVÁNÍ	72
5.4	VÝSLEDKY PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK	76
5.4.1	VLASTNOSTI BETONU V ČERSTVÉM STAVU	76
5.4.1.1	KONZISTENCE ČERSTVÉHO BETONU – ZKOUŠKA SEDNUTÍM76	

5.4.1.2	OBJEMOVÁ HMOTNOST ČERTSVÉHO BETONU	77
5.4.1.3	OBSAH VZDUCHU V ČERSTVÉM BETONU	77
5.4.2	VLASTNOSTI BETONU V ZTVRDLÉM STAVU	78
5.4.2.1	OBJEMOVÁ HMOTNOST BETONU VE ZTVRDLÉM STAVU	78
5.4.2.2	PEVNOST V TAHU OHYBEM	81
5.4.2.3	PEVNOST V TLAKU	83
5.4.2.4	PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU	84
5.4.3	OVĚŘENÍ PŘÍTOMNOSTI ČEDIČOVÝCH VLÁKEN VE VZORKU	88
5.5	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE	93
6	ZÁVĚR	95
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	97
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	101
9	SEZNAM TABULEK	103
10	SEZNAM GRAFŮ	105
11	SEZNAM PŘÍLOH	107

1 ÚVOD

Vláknobetony jsou speciálním druhem betonu, který obsahuje mimo běžných složek i rovnoměrně distribuovaná vlákna v podobě rozptýlené výztuže. Přídavku vláken se přisuzuje zlepšení některých vlastností, které u prostého betonu považujeme za jeho slabiny. V závislosti na materiálu, z kterého jsou vlákna vyrobena, můžeme dosáhnout zlepšení houževnatosti nebo zamezení projevu objemových změn v raných stádiích zrání. U vláken s dostatečnou pevností a vhodným modulem pružnosti můžeme u betonové konstrukce zaznamenat zvýšení pevnosti v tahu nebo pevnosti v tahu ohybem. Mimo ocelových, skleněných, polypropylenových a uhlíkových vláken se do popředí zájmu dostávají i vlákna čedičová.

Čedičová vlákna se vyrábějí podobně jako vlákna skleněná, bez potřeby přidání dalších látek, čímž se stává výrobní proces ekonomicky výhodný. Vyznačují se vysokou chemickou odolností vůči anorganickým i organickým kyselinám, vysokou tahovou pevností a vhodným elastickým chováním. V experimentech, které byly doted' realizovány, se při použití v cementových kompozitech projevilo zlepšení tahových pevností.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 ČEDIČ

Čedič je výlevná magmatická hornina, která se nachází ve vulkanických skalách vytvořených ze zmrzlé lávy. V závislosti na teplotě, která při chladnutí čediče nastala, proběhla více či méně dokonalá krystalizace. Taktéž jeho vlastnosti jsou závislé na teplotě, při které vznikl. Asi 80 % horniny tvoří dva důležité minerály, a to plagioklas a pyroxen. Z chemického hlediska jsou hlavními složkami SiO_2 a Al_2O_3 . [1,2,3]

Tabulka 1 – Vlastnosti taveného čediče [4]

parametr	jednotka	hodnota	DIN 280062
tvrdost dle Mohse	-	8	
objemová hmotnost	kg.m^{-3}	2900 – 3000	2800 – 2900
pevnost v tlaku	MPa	450	450 – 500
obrusnost	$\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$	max. 5	4 – 6
odolnost proti opotřebení	mm^3	110	
nasákavost	% hmotnostní	0	0
tepelná vodivost	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	1,9 – 2,2	1,0 – 1,2
odolnosti proti tepelným šokům	$^{\circ}\text{C}$	100	
rozpustnost v kyselině sírové	% hmotnostní	9	
izolační odpor	Ohm	1010	

2.2 VÝROBKY Z TAVENÉHO ČEDIČE

2.2.1 ČEDIČOVÁ VLÁKNA

Čedičová vlákna jsou vyráběna z čedičové horniny, která je tavená při teplotě 1400 – 1500 $^{\circ}\text{C}$. Tato vlákna jsou z environmentálního hlediska bezpečná, netoxická a jsou velmi stabilní. Čedičová vlákna jsou v poslední době považována za vhodnou alternativu ke klasické ocelové výztuži pro betonové konstrukce. Na rozdíl od uhlíkových nebo skleněných vláken není jejich používání tak rozšířené. [5]

Čedičové vlákno bylo vyvinuto Výzkumným ústavem skla a plastu v Moskvě v roce 1953 a 1954. Výrobní proces je podobný jako u skleněných vláken, ale s menší spotřebou energie a bez potřebných přísad, což je ekonomicky výhodnější, než u skleněných nebo uhlíkových vláken. [6]

Tabulka 2 – Chemické složení čedičových vláken podle dvou různých zdrojů [1,7]

složka [%]	zdroj 1	zdroj 2
SiO ₂	43,3 – 47,0	42,43 – 55,69
Al ₂ O ₃	11,0 – 13,0	14,21 – 17,97
Fe ₂ O ₃	< 5,0	10,80 – 11,68
CaO	10,0 – 12,0	7,43 – 8,88
MgO	8,0 – 11,0	4,06 – 9,45
Na ₂ O	< 5,0	2,38 – 3,79
TiO ₂	< 5,0	1,10 – 2,55
K ₂ O	< 5,0	1,06 – 2,33

2.2.1.1 VLASTNOSTI

2.2.1.1.1 VZHLED

Čedičová vlákna mají sklovitou strukturu, jejich povrch je hladký a průřez kruhovitý. Barevnost závisí hlavně na použitých surovinách, konkrétně obsahu oxidů železa. Mohou být hnědá, hnědozelená, anebo hnědošedá. [27]



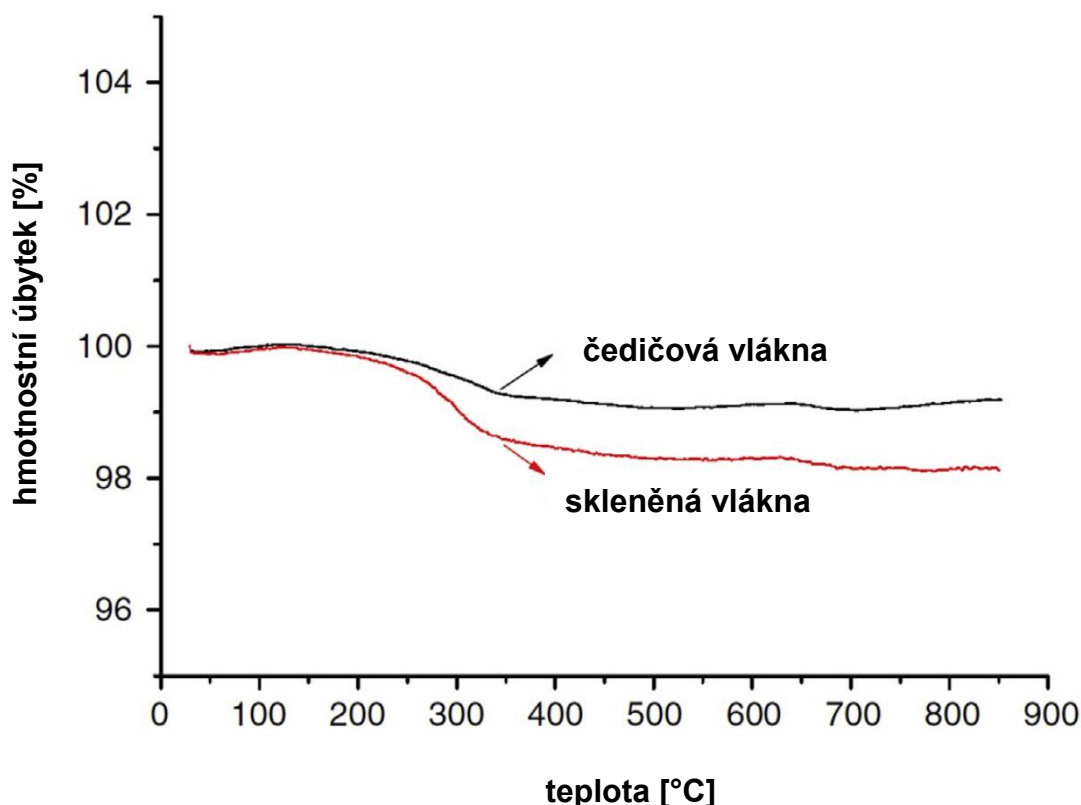
Obrázek 1 – Čedičová vlákna [28]

2.2.1.1.2 TEPLOTNÍ ODOLNOST A STABILITA

Čedičová vlákna jsou nehořlavá a mohou být vystavena velmi nízkým teplotám, až do - 200 °C. Co se týče vysokých teplot, mohou být použita až do teploty 800 °C. Tepelná stabilita závisí hlavně na složení suroviny a obsahu mikropórů, které zabraňují konvekci vzduchu. Z těchto důvodů se materiály z čedičových vláken mohou použít jako tepelná izolace nebo pasivní ochrana proti ohni. [8,9,10]

Experiment, který uskutečnili Hao a Yu, ukazuje, že ke ztrátě hmotnosti dochází při teplotě v rozmezí 200 – 350 °C, jak pro čedičové, tak i pro skleněné vlákno, což můžeme vidět i v grafu 1. [11]

Förster a kolektiv zjišťovali změnu pevnosti čedičových vláken při vysokých teplotách. Ukázalo se, že namáhání pomocí vysokých teplot výrazně sníží pevnost v tahu vláken. Maximální pokles pevnosti v tahu proběhl při teplotě 350 °C, což je stejná teplota, jako u výše zmíněného experimentu. [12]



Graf 1 – TGA křivka pro skleněná a čedičová vlákna [11]

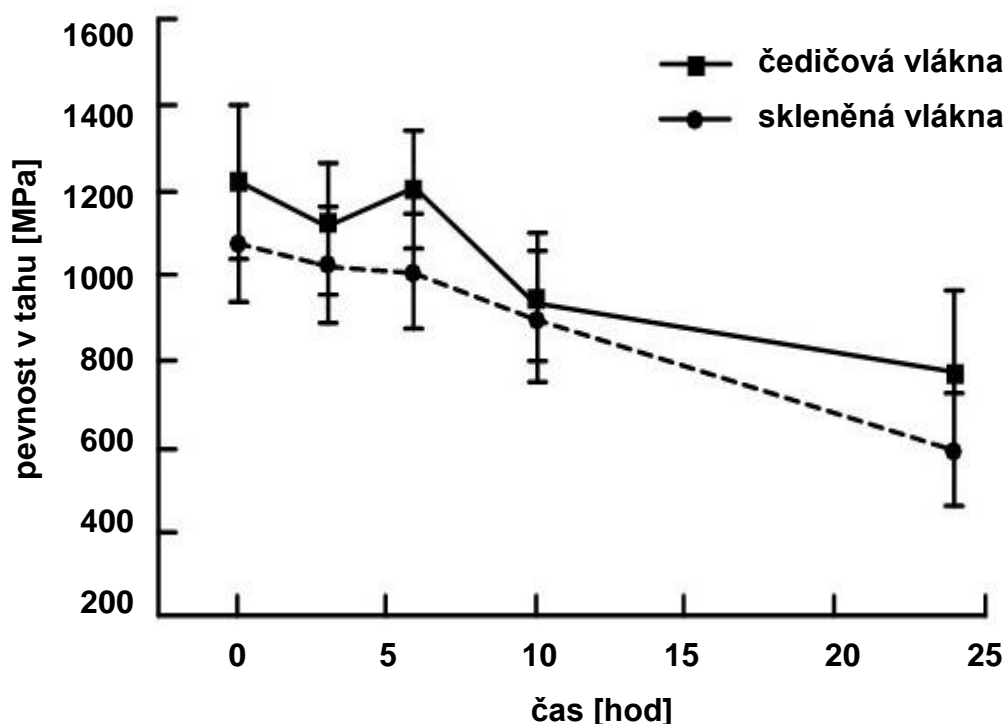
2.2.1.1.3 CHEMICKÁ ODOLNOST

Čedičová vlákna mají vysokou chemickou stabilitu a odolnost vůči organickým i anorganickým kyselinám. V porovnání se skleněnými vlákny se vyznačují lepší odolností v alkalickém prostředí. [11]

Při experimentálním zkoušení bylo porovnáno uložení čedičových a skleněných vláken v silně alkalickém roztoku NaOH a roztoku cementu. Bylo zjištěno, že u obou vláken dochází v roztoku NaOH k masivnímu rozpouštění vnější vrstvy. Při stejném pH v roztoku cementu dochází pouze k mírnému lokálnímu porušení. [9]

Podobný závěr dokázal i Ying a kolektiv, kdy testovali čedičová i skleněná vlákna v prostředí roztoku NaOH o koncentraci $c = 2 \text{ mol.l}^{-1}$ při teplotě 100°C . Z grafu 2 můžeme vidět, že změna pevnosti v tahu u čedičových vláken klesá ze začátku rychleji, ke konci se zpomalí a hodnoty jsou i tak příznivější než u skleněných vláken, což je výhodné hlavně při dlouhodobém působení alkalických látek. [10]

Rybin a kol. dokázal, že zirkonový povlak na vláknech zpomaluje degradaci vlivem silně alkalického prostředí. [13]



Graf 2 – Změna pevnosti v tahu čedičových a skleněných vláken v závislosti na čase při uložení v roztoku NaOH o koncentraci $c = 0,2 \text{ mol.l}^{-1}$ při teplotě 100°C [10]

2.2.1.1.4 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Vysoké moduly pružnosti, tahové pevnosti a vhodné elastické chování přispívají k tomu, že se tyto vlákna stávají dobrou alternativou k tradičně používaným materiálům. Můžeme tedy říct, že pokud jde o porovnání odolnosti a modulů pružnosti, jsou čedičová vlákna porovnatelná, nebo i lepší jak vlákna skleněná. [7,9]

Mechanické vlastnosti úzce souvisí s přítomností strukturních chyb a defektů, které způsobují to, že jejich naměřené mechanické vlastnosti mohou být mnohem nižší než jejich maximální teoretické hodnoty. Tento nedostatek můžeme ovlivnit nanášením povlaku ve formě tenkého filmu na bázi epoxidové pryskyřice. [14]

Tabulka 3 – Porovnání vybraných fyzikálně-mechanických vlastností čedičových a skleněných vláken [9]

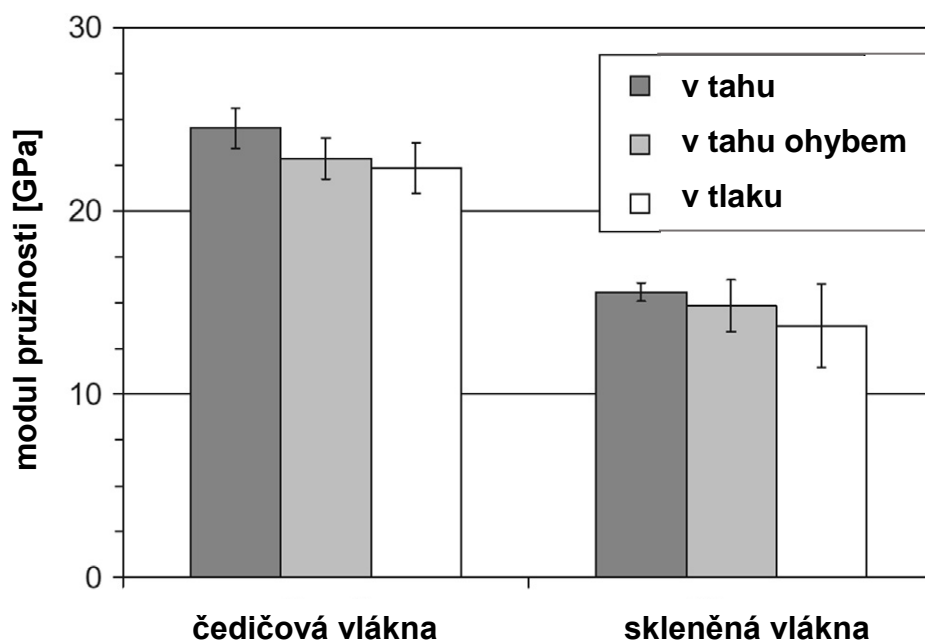
	skleněná vlákna	čedičová vlákna
hustota [kg.m⁻³]	2560	2800
modul pružnosti v tahu [GPa]	76	89
pevnost v tahu [MPa]	1400 – 2500	2800
pevnost v tlaku [MPa]	300	300
prodloužení při porušení [%]	1,8 – 3,2	3,15
pracovní teplota [°C]	- 200 až + 700	- 60 až + 460

Tabulka 4 – Porovnání vybraných vlastností čedičových, skleněných a uhlíkových vláken [15]

vlastnost	čedičová	e-sklo	s-sklo	uhlíková
pevnost v tahu [MPa]	3 000 – 4 840	3 100 – 3 800	4 020 – 4650	3 500 – 6 000
modul pružnosti v tahu [GPa]	79,3 – 93,1	72,5 – 75,5	83 – 86	230 – 260
protažení při porušení [%]	3,1	4,7	5,3	1,5 – 2,0
průměr vlákna [mikrometr]	6 – 21	6 – 21	6 – 21	5 – 15
cena [USD/kg]	2,5 – 3,0	1,1	1,5 – 2,5	30 – 50

Tabulka 5 – Charakteristika čedičových vláken od společnosti Orlimex CZ, s.r.o. [30]

charakteristika		hodnota
základní průměr vlákna [μm]		9, 13, 17
tolerance – odchylka v základním průměru u vlákna 9 [mm]		- 1; + 2
tolerance – odchylka v základním průměru u vlákna 13 a 17 [mm]		- 2; + 1
délka vlákna [mm]		6, 12, 18, 24, 30
barva		tmavá olivová
vůně/zápach		bez vůně
obsah vlhkosti [%]		< 1
obsah látek odpařených kalcinací [%]		0,2 – 2
povolený počet nesestříhaných vláken [%]		< 0,1
chemická odolnost – úbytek hmotnosti během 3 dnů [%]	H ₂ O	1
	2H NaOH	2,5
	2H HCl	2,5
dávkování [kg.m ⁻³]		1,8
doba míchání v míchačce [min]		6 – 7
doba míchání v automixu [min]		7 – 9



Graf 3 – Porovnání modulů pružnosti v tahu, v tahu ohybem a v tlaku u čedičových a skleněných vláken [16]

Tabulka 6 – Značení čedičových a skleněných vláken použitých při zjišťování modulu pružnosti v tahu a jejich výrobci [7]

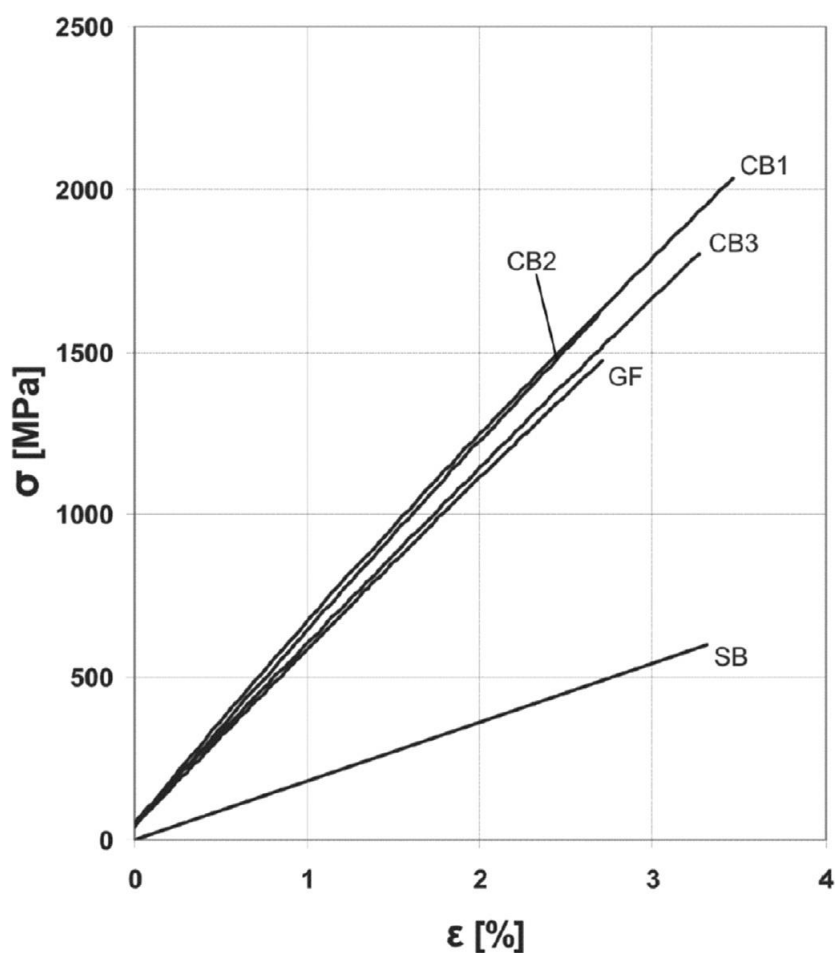
značení	typ vlákna	výrobce
SB	krátká čedičová vlákna	Toplan Ltd., Maďarsko
CB1	nekonečné čedičové vlákno	Kamenny Vek Co., Rusko
CB2	nekonečné čedičové vlákno	D.S.E. Group, Izrael
CB3	nekonečné čedičové vlákno	Technobasalt Co., Ukrajina
GF	vlákna z E-skla	Skloplast Ltd., Slovensko

Tabulka 7 – Chemické složení čedičových a skleněných vláken použitých u zjišťování modulu pružnosti v tahu [7]

složka [%]	krátká čedičová vlákna (SB)	nekonečné čedičové vlákno (CB1)	nekonečné čedičové vlákno (CB2)	nekonečné čedičové vlákno (CB3)	vlákna z E-skla (GF)
Al₂O₃	17,35	15,44	14,21	17,97	11,86
SiO₂	42,43	55,69	53,36	50,62	58,25
CaO	8,88	7,43	7,74	8,85	21,09
Fe₂O₃	11,68	10,8	10,98	11,11	0,30
K₂O	2,33	1,51	1,06	1,73	0,43
MgO	9,45	4,06	5,35	5,19	0,54
Na₂O	3,67	2,40	3,79	2,38	0,30
TiO₂	2,55	1,23	1,73	1,10	0,41

Tabulka 8 – Naměřené hodnoty u vláken uvedených v tabulce 6 [7]

značení	průměr [μm]	průřezová plocha [μm^2]	maximální síla [N]	pevnost v tahu [MPa]	poměrné přetvoření [%]	modul pružnosti v tahu [GPa]	hustota [kg.m ⁻³]
SB	10,3 ± 3,1	90,2 ± 56,7	0,05 ± 0,04	602 ± 295	1,29 ± 0,48	48,2 ± 20,6	2,7
CB1	14,2 ± 1,4	160,2 ± 30,3	0,32 ± 0,09	2 016 ± 434	3,56 ± 0,89	61,9 ± 3,5	2,6
CB2	12,7 ± 1,5	128,1 ± 31,5	0,21 ± 0,07	1 608 ± 350	2,72 ± 0,67	62,0 ± 3,6	2,6
CB3	14,1 ± 2,9	163,5 ± 63,3	0,30 ± 0,13	1 811 ± 331	3,47 ± 0,70	53,2 ± 7,4	2,6
GF	16,8 ± 1,6	223,4 ± 42,0	0,32 ± 0,08	1 472 ± 395	2,71 ± 0,86	57,0 ± 3,0	2,6



Graf 4 – Pracovní diagram krátkých čedičových vláken, nekonečných čedičových vláken od tří výrobců a skleněných vláken [7]

Všechna vlákna vykazují chování bez plastických deformací (viz graf 4). U nekonečného čedičového vlákna (CB1, CB2, CB3) a vláken z E-skla (GF) můžeme pozorovat velmi

podobný modul pružnosti v tahu, přičemž krátká čedičová vlákna (SB) mají modul pružnosti v tahu menší. [7]

2.2.1.1.5 ZDRAVOTNÍ NEZÁVADNOST

Vzrůstající aplikace čedičových vláken vyvolala otázku, jestli je toto vlákno zdraví škodlivé. I když jsou azbestová a čedičová vlákna podobného složení, čedič se jeví jako bezpečný. Jeho morfologie je odlišná a povrchové vlastnosti zabraňují všem karcinogenním nebo toxickým vlivům, které můžeme pozorovat u azbestu. Vlákná s menším průměrem jako 1,5 μm lze vdechnout, jinak nejsou příčinou žádných zdravotních potíží. [17,18]

2.2.1.2 TECHNOLOGIE VÝROBY

Čedičová vlákna lze rozdělit na dva druhy – krátká vlákna a vlákno nekonečné. Výrobní proces čedičových vláken je podobný jako u vláken skleněných, jen je méně energeticky náročný a není potřeba přidávat žádné další látky, či aditiva. K prvotnímu roztavení, homogenizaci a obohacení čediče může dojít již při vulkanické činnosti samovolně v přírodě – tedy při jeho vzniku – v důsledku toho můžeme říct, že výroba čedičových vláken je levnější jak u vláken skleněných, či uhlíkových. [9,19]

Důležitými podmínkami při výrobě jsou: nutnost konstantního složení horniny, její dobrá dostupnost, snadná tavitelnost a dostatečný obsah SiO_2 a Al_2O_3 . Vlákná musí mít sklovitou strukturu, nesmí krystalizovat při provozních teplotách. [27]

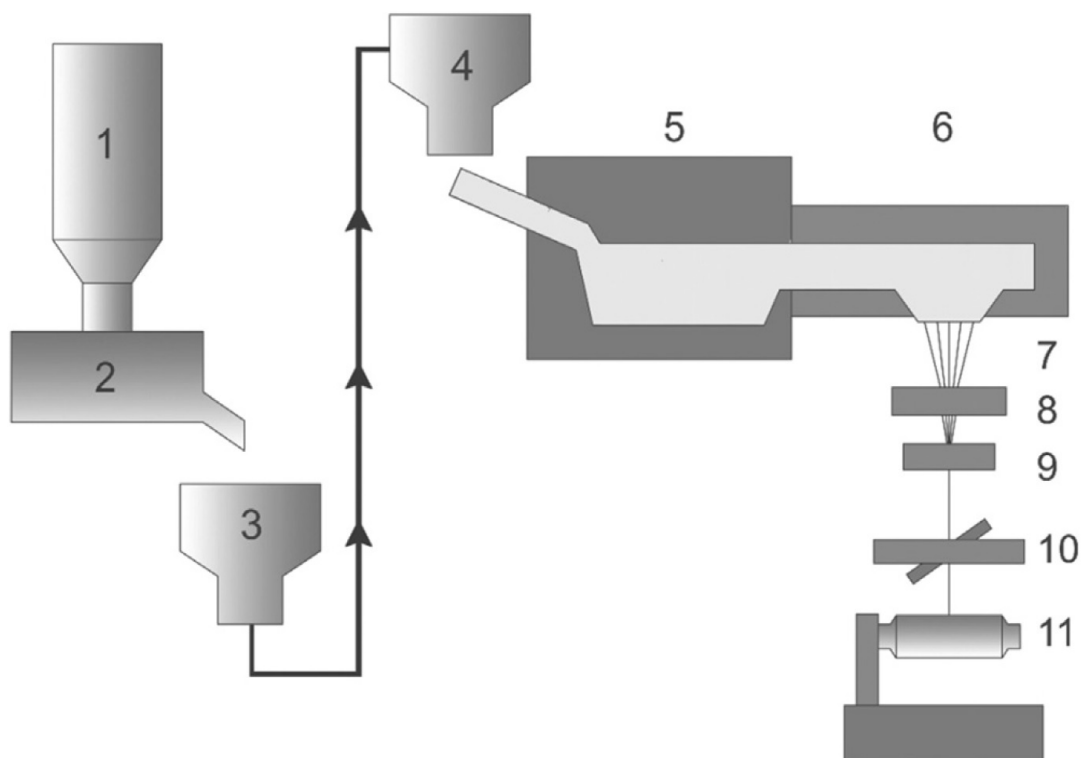
Před zahájením výroby čedičových vláken jsou sutiny horniny rozdrceny na požadovanou frakci (5 – 12 mm) a proběhne vstupní kontrola kvality. Po selekci kovových inkluzí pomocí magnetu vzniká čedičová surovina ve formě jemného šterku, která se následně promývá za účelem zbavení se malých nečistot a prachu. Takto upravená hmota se suší za normálních podmínek při cirkulaci vzduchu pomocí ventilace nebo ve speciálním sušicím zařízení – výběr metody je závislý na klimatických podmínkách výroby. Pomocí jeřábu nebo zvedacího zařízení je čedičová hmota nakládána do násypky umístěné na tavicím zařízení. [20]

Tavicí zařízení je regenerativní a kontinuální pec s přímým plynovým ohřevem. V peci se čedičová surovina roztaví, po homogenizaci a následném tvarování je vytvářeno kontinuální čedičové vlákno. Tavení probíhá při teplotě $(1500 \pm 50)^\circ\text{C}$ za současného spalování směsi složené ze zemního plynu a vzduchu. Spalovací vzduch je dodáván

z vysokotlakého ventilátoru přes výměník, kde je ohříván spalovacími plyny na teplotu 450 – 600 °C, plyn je přiváděn z plynové rozvodny. [20]

Roztavená hmota vlivem gravitace prochází přes podavač pece k podavači ve spodní částí, kde je dávkovač, který dávkuje taveninu do forem (pouzder) ze slitiny platiny a rhodia, kde začíná tvorba elementárního nekonečného vlákna. Tavenina je proudovým podavačem s elektrickým ohřevem dodávána do platinových forem (pouzder), které jsou také elektricky zahřívány, kde už zvlákňovací trysky formují prameny základního vlákna protahováním přes tažné zařízení. V tomto momentě je aplikovaná vrstva maziva. [20]

V případě, že výsledným produktem mají být krátká čedičová vlákna, je zařazeno i řezání vláken, která mají vlhkost 8 – 10 %. Vysoušení na požadovanou vlhkost 0,1 % následně probíhá ve vysoušecích pecích za teploty 120 – 160 °C po dobu přibližně 12 hodin. Po výstupní kontrole kvality jsou vlákna balena a vyexpedována. [20]



Obrázek 2 – Zjednodušené schéma výrobní linky čedičových vláken: 1) zásobník na podrcenou horninu; 2) plnicí zařízení; 3) přesun materiálu; 4) dávkovací zařízení; 5) primární tavící pásmo; 6) sekundární tavící pásmo včetně teplotního kontrolního zařízení; 7) pouzdro formující vlákna; 8) dimenzování vláken; 9) vytváření pramene; 10) napínací zařízení; 11) navíjecí zařízení [7]

Krátká vlákna mohou být vyráběna i odstředivým způsobem za použití rozvlákňovacího kotouče nebo na zařízení s horizontální osou, anebo rozfoukáváním. [27]

2.2.1.3 POUŽITÍ V CEMENTOVÝCH KOMPOZITECH

V současnosti se do cementových nebo betonových kompozitů používají různé typy vláken, například vlákna ocelová nebo skleněná. Ocelová vlákna mají sice vysoký modul pružnosti a pevnost, proto jejich přídavek zlepšuje pevnost v tahu ohybem a houževnatost betonu, ale problémem je hlavně jejich menší odolnost vůči korozi. U skleněných vláken je hlavní nevýhodou jejich nízká odolnost v alkalickém prostředí, u uhlíkových vláken je to vyšší cena a anizotropie. Syntetická vlákna, hlavně polymerní, mají nízký modul pružnosti, nízkou teplotu tání a slabé spolupůsobení s anorganickou matricí. [7, 16, 21]

Dobrou alternativou k výše zmíněným vláknům se v poslední době jeví i čedičová vlákna. Jejich výroba je méně energeticky a ekonomicky náročná, jelikož nevyžaduje žádné přísady. Dalšími výhodami jsou vysoký modul pružnosti, odolnost vůči vysokým teplotám a chemickým látkám a v neposlední řadě i komerční dostupnost. Jejich obvyklé dávkování je kolem 1,5 – 2,5 kg.m⁻³. [22]

V minulosti bylo provedeno již mnoho výzkumů na kontinuálním čedičovém vlákně, avšak poznatky o vlivu krátkého čedičového vlákna na vlastnosti betonu jsou omezené. [23]

Dias a Thaumaturgo zkoumali závislost mezi množstvím čedičových vláken a lomovou houževnatostí na betonovém nosníku vyztuženém těmito vlákny. Výsledky ukázaly vyšší konečné lomové zatížení a menší citlivost vůči trhlinám. Při zkouškách v tahu ohybem, vzorky z prostého betonu vykazovaly křehké chování. Naopak vzorky s přídavkem čedičových vláken vykazovaly vyšší houževnatost, a i po počátečním porušení přenášely určité zatížení do samotného přetržení vláken nebo jejich vytržení z cementové matrice. [23]

Zielinski a Olszewski testovali fyzikálně-mechanické vlastnosti cementové malty vyztužené čedičovými vlákny po 28 dnech zrání, aby zjistili optimální množství jejich přídavku, a to v rozmezí 0,5 až 0,8 % z hmotnosti cementu. [24]

Zhao a kolektiv zjišťovali chování takto vyztuženého betonu a výsledek ukázal, že přidání čedičových vláken vede k zjevnému zlepšení houževnatosti daného materiálu. [25]

Z výše uvedených výsledků, můžeme usoudit, že zatím není dostatek informací o vlivu základních parametrů vláken – objemový obsah, délka vláken – na vlastnosti zkoušeného betonu. [26]

2.2.1.4 KONKRÉTNÍ APLIKACE V CEMENTOVÉM KOMPOZITU

V této studii vykonal Jiang a kolektiv experiment, který sledoval vliv čedičových a polypropylenových vláken na vliv čerstvého i ztvrdlého betonu.

2.2.1.4.1 SLOŽKY

Na namíchání zkušebních těles byl ve všech směsích použit portlandský cement, popílek, hrubé kamenivo s maximálním zrnem 5 mm a jemné kamenivo frakce 0 – 3 mm. Jako rozptýlená výztuž byly použity vlákna čedičová s délkou 12 a 22 mm a průměrem 20 μm a polypropylenová vlákna s délkou 9 – 22 mm. U čedičových vláken bylo namícháno 5 receptur s jejich obsahem 0 %; 0,05 % ($1,33 \text{ kg.m}^{-3}$); 0,1 % ($2,65 \text{ kg.m}^{-3}$); 0,3 % ($7,95 \text{ kg.m}^{-3}$) a 0,5 % ($13,25 \text{ kg.m}^{-3}$) z celkového objemu namíchané směsi. U polypropylenových vláken byl testován obsah 0 %; 0,05 % ($0,46 \text{ kg.m}^{-3}$); 0,1 % ($0,91 \text{ kg.m}^{-3}$) a 0,3 % ($2,73 \text{ kg.m}^{-3}$) z objemu směsi. V závorkách je uvedeno hmotnostní dávkování na 1 m^3 betonu. [26]

Tabulka 9 – Složení betonové směsi [26]

složka	[kg.m^{-3}]
cement	448,84
popílek	126,14
drobné kamenivo 0 – 3 mm	624,35
hrubé kamenivo < 5 mm	1024,04
voda, w = 0,6	269,68

Tabulka 10 – Druhy použitých vláken a jejich vybrané vlastnosti [26]

druh vlákna	délka [mm]	hustota [g.cm^{-3}]	modul pružnosti [GPa]	pevnost v tahu [MPa]	prodloužení při lomu [%]	nasákavost [%]
polypropylenová vlákna	4 – 19	0,91	4 – 9	400 – 700	7 – 9	< 0,1
čedičová vlákna	12	2,65	93 – 110	4100 – 4800	3,1 – 3,2	< 0,5
	22					

2.2.1.4.2 MÍCHÁNÍ SMĚSI

Nejdřív proběhlo suché smíchání hrubého a jemného kameniva, následně byl přidán cement a popílek. Do stále suché směsi byla přidána vlákna a jako poslední složka voda. Míchání čerstvé směsi trvalo 3 minuty, aby bylo zabezpečeno rovnoměrné rozptýlení vláken v betonu. [26]

Čerstvá směs byla plněna do forem pro zkoušky na pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku a v tahu. Následně byly formy přikryty polyetylenovou folií kvůli zabránění ztrátě vlhkosti. Po 24 hodinách byly vzorky přesunuty do vodného uložení při teplotě 20 °C. [26]

2.2.1.4.3 ZKUŠEBNÍ METODY

Pevnost v tlaku a pevnost v tahu ohybem byla prováděna na zkušebních vzorcích stárí 7, 28 a 90 dní. U zkoušky pevnost v tahu ohybem bylo použito tříbodové zatížení se vzdáleností podpěr 225 mm. Zkoušky byly prováděny dle Australských norem:

- AS 1012.9-1999 Methods of testing concrete – Determination of the compressive strength of concrete specimens,
- AS 1012.10-2000 Methods of testing concrete – Determination of indirect tensile strength of concrete cylinders ('Brazil' or splitting test),
- AS1012.11-1985 Methods of testing concrete - Method for the determination of the flexural strength of concrete specimens. [26]

2.2.1.4.4 KONZISTENCE SMĚSI

U prostého betonu bylo naměřeno sednutí kužele 185 mm. V tabulce 11 můžeme vidět, že se zvyšujícím se dávkou jak polypropylenových, tak i čedičových vláken se sednutí snižuje, což může vést ke zhoršování zpracovatelnosti čerstvé směsi. Vyšší měrný povrch vláken potřebuje víc cementového tmele na samotné obalení. Z tabulky je taky zřejmé, že delší čedičová vlákna rozměru 22 mm vykazují vyšší hodnoty sednutí. Důvodem je, že u kratších vláken je jejich distribuce ve směsi hustší. [26]

2.2.1.4.5 PEVNOST V TLAKU

Všechny výsledky pevnosti v tlaku jsou uvedené v tabulce 11. Jak můžeme vidět, nastává velmi mírný nárůst pevnosti v tlaku u všech testovaných receptur oproti referenční směsi, což však nemůžeme považovat za žádné zřejmé zlepšení výsledných hodnot. Taktéž můžeme zaznamenat mírný nárůst pevnosti u všech těles stárí 28 dní

v porovnání se sedmidenními. U vzorků stáří 90 dní můžeme pozorovat pokles hodnot v porovnání s referenční směsí. Důvodem může být stárnutí rozhraní mezi vláknem a cementovou maticí. [26]

Z výše uvedené analýzy můžeme říct, že delší vlákna představují příznivý vliv na pevnost v tlaku, ale ne velmi zřejmou. Při použití čedičových vláken o délce 22 mm vykazuje beton zvýšení pevnosti v tlaku vůči stejným vláknům o délce 12 mm. Tento jev může být způsobený tím, že delší vlákno má silnější efekt přemostění a odolnosti vůči vytrhnutí, což přispívá k lepším pevnostem. [26]

Po destrukci referenčních zkušebních těles z prostého betonu se na jejich povrchu vytvořily široké vertikální trhliny. Při vláknobetonu zůstávají vzorky v relativně dobrém stavu bez množství zjevných vertikálních trhlin. [26]

Tabulka 11 – Pevnost v tlaku a efektivita pevnosti všech receptur (efektivita = podíl rozdílu pevnosti v tlaku vláknobetonu a prostého betonu k pevnosti v tlaku prostého betonu) [26]

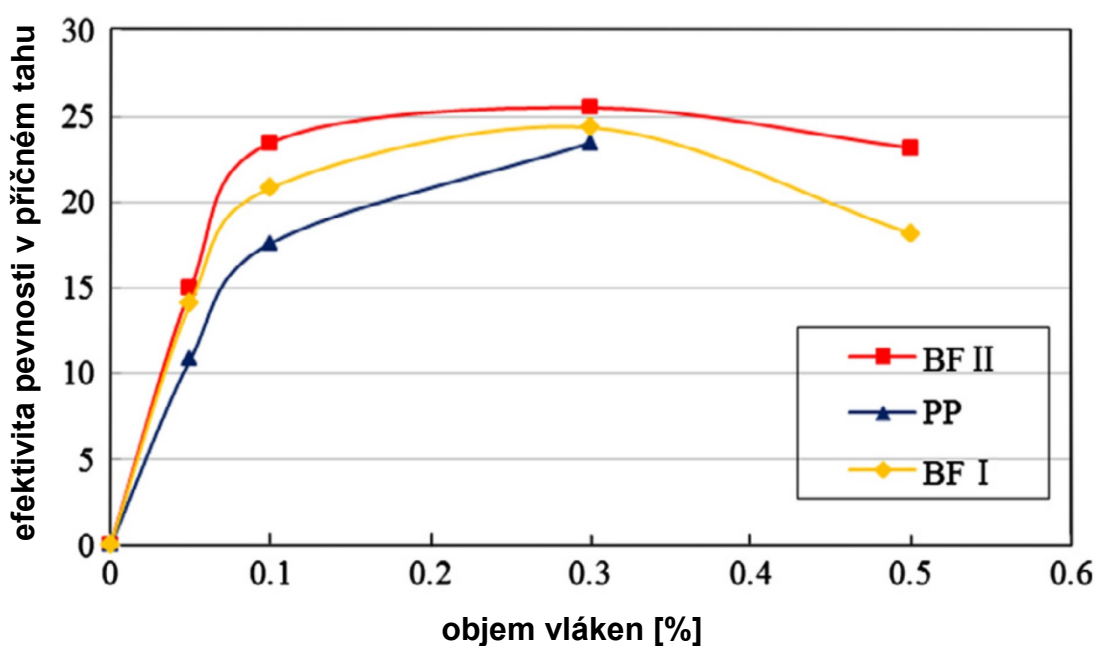
označení směsi	délka vláken [mm]	procentuální obsah vláken [%]	sednutí [mm]	7 dní		28 dní		90 dní	
				pevnost v tlaku [MPa]	efektivita [%]	pevnost v tlaku [MPa]	efektivita [%]	pevnost v tlaku [MPa]	efektivita [%]
C0	-	-	185	38,21	-	45,12	-	52,19	-
PP1	4 – 19	0,05	142	39,12	2,41	45,65	1,22	52,66	0,90
PP2		0,10	124	40,54	6,13	47,12	4,48	51,34	- 1,63
PP3		0,30	59	39,85	4,32	45,84	1,64	50,56	- 3,12
BFI1	12	0,05	172	39,63	3,74	46,75	3,66	53,01	1,57
BFI2		0,10	157	41,27	8,04	47,21	4,68	52,10	- 0,17
BFI3		0,30	87	41,52	8,69	46,28	2,62	51,16	- 1,97
BFI4		0,50	65	40,68	6,49	45,02	-0,18	50,45	- 3,33
BFI11	22	0,05	170	40,42	5,81	46,95	4,10	54,12	3,70
BFI12		0,10	155	41,23	7,93	47,68	5,72	53,10	1,74
BFI13		0,30	81	42,18	10,42	46,96	4,12	51,21	- 1,88
BFI14		0,50	60	41,32	8,17	45,35	0,55	50,56	- 3,12

Označení směsí: C0 – referenční směs bez přídavku vláken, PP – směs s přídavkem polypropylenových vláken, BFI – směs s přídavkem čedičových vláken v délce 12 mm, BFII – směs s přídavkem čedičových vláken v délce 22 mm.

Pevnosti jsou zaokrouhleny na 2 desetinná místa – převzato z odborného článku [26]

2.2.1.4.6 PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU

Graf 5 zobrazuje efektivitu pevnosti v příčném tahu (*efektivita = podíl rozdílu pevnosti v příčném tahu vláknobetonu a prostého betonu k pevnosti v příčném tahu prostého betonu*) na zkušebních vzorcích o stáří 28 dnů, z nichž je patrné zlepšení těchto hodnot u vláknobetonu, konkrétně u čedičových vláken můžeme dosáhnout lepších hodnot než u polypropylenových vláken. Čedičová vlákna zvyšují hodnoty pevnosti v příčném tahu přibližně o 14,08 – 25,51 %, lehce vyšší efekt je u delších 22 mm vláken. Důvodem je přemostování trhlin pomocí vláken, tedy i účinné omezení šíření mikrotrhlin v počátečním stádiu. [26]



Graf 5 – Závislost procentuálního objemu vláken na efektivitě pevnosti v příčném tahu (*efektivita = podíl rozdílu pevnosti v příčném tahu vláknobetonu a prostého betonu k pevnosti v příčném tahu prostého betonu*) [26]

2.2.1.4.7 PEVNOST V TAHU OHYBEM

Tabulka 12 ukazuje výsledky ze zkoušky pevnosti v tahu ohybem po 7, 28 a 90 dnech. Předcházející studie [26,30] uvádí, že přidavek vláken do betonu může výrazně zlepšit ohybové chování betonu. U betonu s polypropylenovými vlákny byl nárůst hodnot v rozmezí od 3,38 % až 16,10 %, kratších čedičových vláken 9,18 % – 21,10 % a u delších čedičových vláken 11,11 % – 25,28 % po 7 dnech. Při vyšším obsahu podílu vláken 0,5 % byl zaznamenán mírný pokles pevnosti v porovnání s 0,3 % obsahem vláken, což může být způsobeno těžkostmi při rozptýlení vláken při míchání čerstvé

směsi. U vláknobetonu s obsahem čedičových vláken se lépe jeví délka vláken 22 mm. Vlákná vykazují lepší ukotvení v cementové matici a silnější efekt přemostění trhlin. [26]

Tabulka 12 – Pevnost v tahu ohybem a efektivita pevnosti všech receptur (efektivita = podíl rozdílu pevnosti v tahu ohybem vláknobetonu a prostého betonu k pevnosti v tahu ohybem prostého betonu) [26]

označení směsi	délka vláken [mm]	procentuální obsah vláken [%]	7 dní		28 dní		90 dní	
			pevnost v tahu ohybem [MPa]	efektivita [%]	pevnost v tahu ohybem [MPa]	efektivita [%]	pevnost v tahu ohybem [MPa]	efektivita [%]
C0	-	-	6,21	-	7,62	-	8,01	-
PP1	4 – 19	0,05	6,42	3,38	7,92	3,94	8,10	1,12
PP2		0,10	6,90	11,11	8,02	5,25	8,15	1,75
PP3		0,30	7,21	16,10	8,15	6,96	8,13	1,50
BFI1	12	0,05	6,78	9,18	8,10	6,30	8,15	1,75
BFI2		0,10	7,12	114,65	8,23	8,01	8,20	2,37
BFI3		0,30	7,52	21,10	8,36	9,58	8,25	3,00
BFI4		0,50	7,45	19,97	8,30	8,92	8,18	2,12
BFI11	22	0,05	6,90	11,11	8,18	7,35	8,18	2,12
BFI12		0,10	7,32	17,87	8,32	9,19	8,22	2,62
BFI13		0,30	7,78	25,28	8,41	10,37	8,28	3,37
BFI14		0,50	7,60	22,38	8,40	10,24	8,20	2,37

Označení směsí: C0 – referenční směs bez přídavku vláken, PP – směs s přídavkem polypropylenových vláken, BFI – směs s přídavkem čedičových vláken v délce 12 mm, BFII – směs s přídavkem čedičových vláken v délce 22 mm.

Pevnosti jsou zaokrouhleny na 2 desetinná místa – převzato z odborného článku [26]

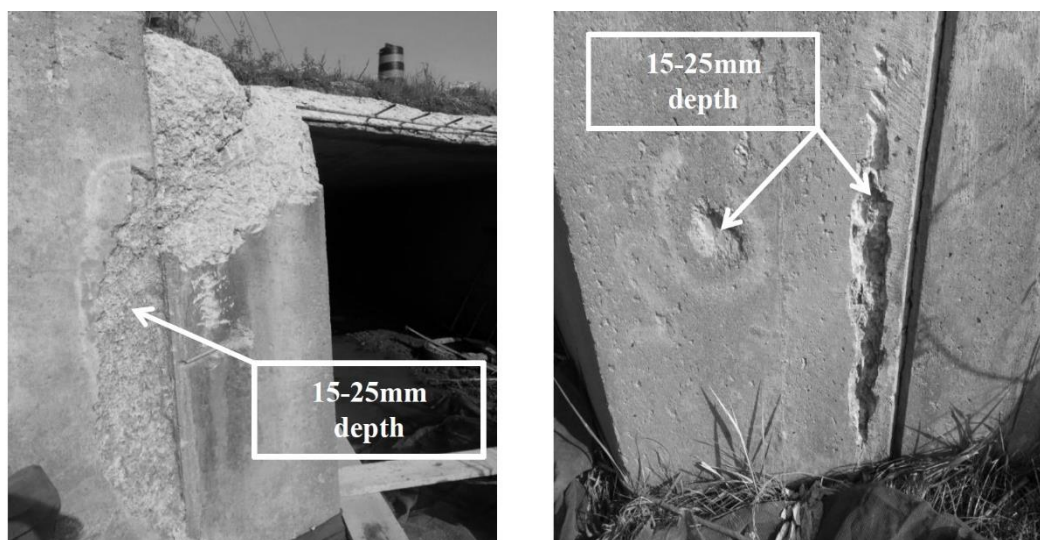
2.2.1.4.8 ZÁVĚR

V této studii vykonali Jiang a kolektiv sérii zkoušek, ve které byly testovány mechanické vlastnosti vláknobetonu s čedičovými a polypropylenovými vlákny v různých hodnotách procentuálního přídavku. Výsledky ukázaly, že přídavek těchto vláken vede ke zhoršení zpracovatelnosti čerstvé směsi. Mechanické vlastnosti čedičových vláken jsou lepší než u vláken polypropylenových (tabulka 10). V porovnání s prostým betonem, vláknobeton s přídavkem čedičových i polypropylenových vláken vykazoval lepší pevnost v tahu ohybem i pevnost v příčném tahu. Co se týče pevnosti v tlaku, v raných

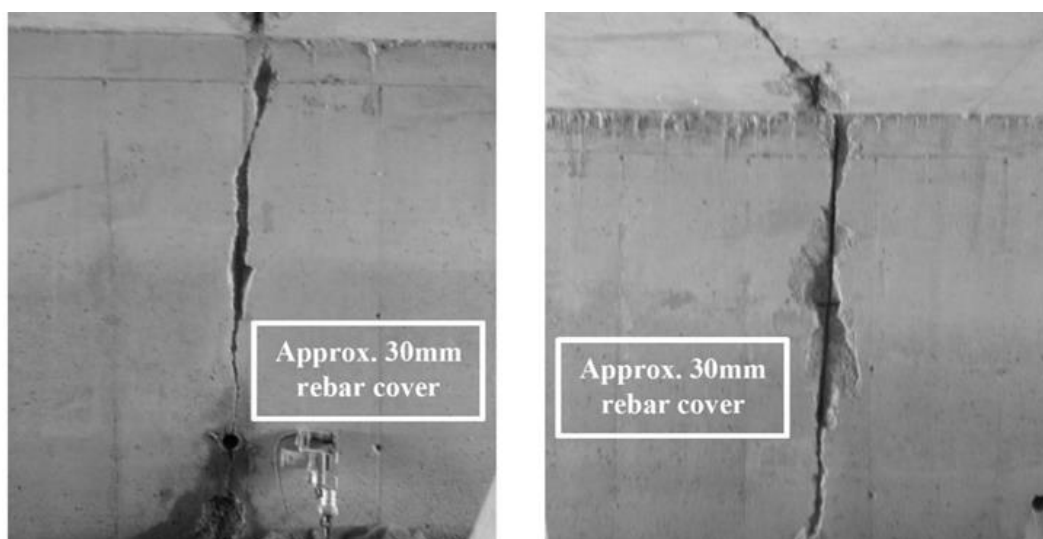
stádiích se pevnost v porovnání s referenční směsí mírně zvyšuje, ale později dokonce klesá – možné je stárnutí rozhraní mezi čedičovým vláknem a cementovým kamenem. Vhodný procentuální obsah na celkový objem směsi s ohledem na výše popsané vlastnosti je kolem 0,3 %, tedy $7,95 \text{ kg.m}^{-3}$. [26]

2.2.1.5 REKONSTRUKCE MOSTU ZA POMOCI BETONU VYZTUŽENÉHO ČEDIČOVÝMI VLÁKNY

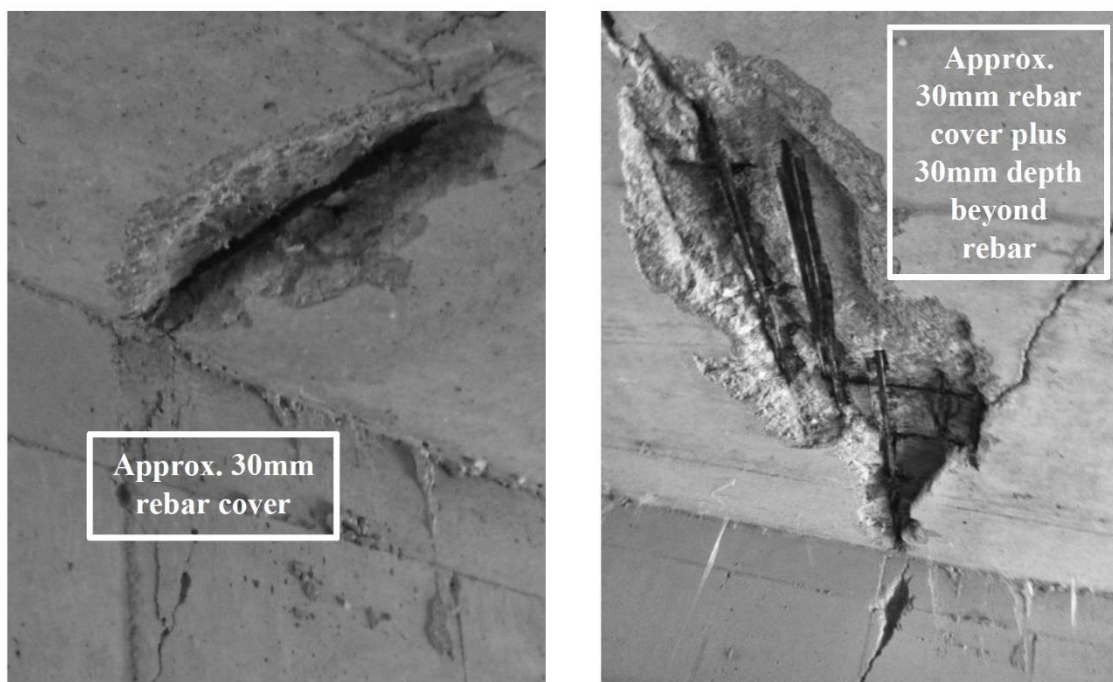
Rekonstrukce byla prováděna na mostu nacházejícího se v provincii Ontário v Kanadě. Most byl poškozen na pěti místech – u opěrných zdí, ze spodu mostovky a na vrchní části konstrukce. [36]



Obrázek 3 – Trhliny v opěrné zdi [36]



Obrázek 4 – Hlavní trhlina na opěrné zdi z obou stran [36]



Obrázek 5 – Hlavní průběžná trhлина s obnaženou výztuží z obou stran mostovky [36]



Obrázek 6 – Obnažená výztuž na spodní části mostovky [36]



Obrázek 7 – Vrchní část konstrukce mostu [36]

Byly použity tři technologie – stříkaný beton, přímé nanášení a hlazení betonu, klasická betonáž. Pro stříkanou směs byla použita čedičová vlákna délky 12 mm v dávce 8 kg.m^{-3} . Směs, která byla nanášena přímo a zahlazena, neobsahovala žádná vlákna. Pro klasickou betonáž byla použita receptura s očekávanými pevnostmi po 28 dnech 35 MPa (bez přidaných vláken). Do směsi byla ručně dodaná čedičová vlákna délky 36 mm v dávce 8 kg.m^{-3} . Do vyvrtaných děr byly vloženy čedičové tyče o průměru 10 mm a opatřeny materiálem na bázi epoxidu pro zajištění spolupůsobení stávající konstrukce s novou. Dodatečně byly do čerstvého betonu vloženy čedičové sítě o průměru oka 25 mm jako opatření pro zamezení trhlin. Všechny výztužné prvky byly opatřeny antikoročním sprejem na bázi epoxidu. [36]



Obrázek 8 – Míchání betonové směsi a následné nanášení stříkáním [36]



Obrázek 9 – Přidávání čedičových vláken do autodomíchavače, čedičové tyče pro zabezpečení spolupůsobení konstrukcí [36]



Obrázek 10 – Umísťovanie čedičových výztužných sítí [36]

2.2.1.5.1 STAV ZREKONSTRUOVANÉ KONSTRUKCE PO ROCE



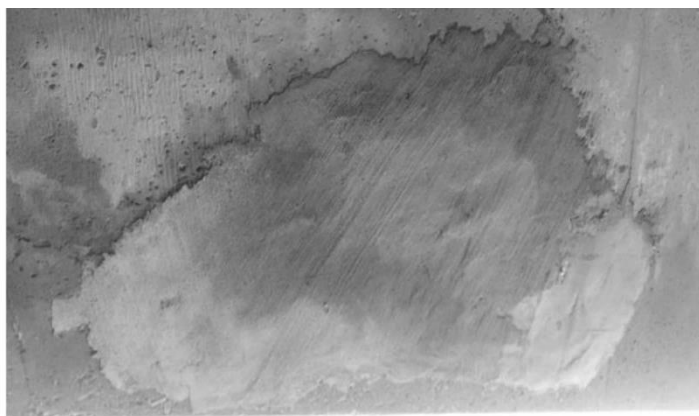
Obrázek 11 – Zrekonštruovaná zed' po jednom roce [36]



Obrázek 12 – Zrekonstruovaná zeď po jednom roce [36]



Obrázek 13 – Zrekonstruovaná spodní část mostovky po jednom roce [36]



Obrázek 14 – Zrekonstruovaná spodní část mostovky po jednom roce [36]



Obrázek 15 – Zrekonstruovaná vrchní část mostové konstrukce po jednom roce [36]

Části konstrukce, na které byly použity technologie stříkáním (s přidavkem čedičových vláken) a hlazením (bez přidavku čedičových vláken) nevykazovaly po roce žádné známky poškození. U míst, kde byla použita klasická betonáž, byla otestována pevnost betonu v tlaku dle ASTM C39 a průměrná hodnota byla stanovena na hodnotu 17 MPa. [36]

Můžeme říct, že místa, kde byl beton nanášen stříkáním, a tedy ve směsi byla přidána čedičová vlákna, vykazují dobrou trvanlivost. Na druhé straně, zatím nemůžeme říct, jestli je zjevný rozdíl mezi místy, kde byl nově aplikován beton s přidavkem vláken nebo bez něj – oba vykazují zatím stejné chování. [36]

Klasická betonáž (obrázek 15) ukázala potenciální problémy způsobené vlivem vláken na zpracovatelnost směsi. Když byla vlákna přidána do betonu, zpracovatelnost byla výrazně snížena. Pro zajištění lepší zpracovatelnosti a z důvodu chybné komunikace

mezi dodavatelem došlo k přidání nepřiměřeného množství vody do čerstvé směsi. Jak je již známo, vodní součinitel a pevnost betonu v tlaku spolu přímo souvisí, a proto se očekávaná pevnost 35 MPa snížila přibližně o 50 % na hodnotu 17 MPa. Pravděpodobný byl i problém se segregací, kdy těžší složky čerstvého betonu klesají dolů a dochází k vystoupení vody na povrch. Důsledkem je slabá, porézní vrstva na povrchu viditelná na obrázku 15. Obecně můžeme beton popsat jako nekvalitní – tyto problémy by byly vyloučeny za použití superplastifikační přísady (nebyla v čase betonáže k dispozici) místo většího množství vody. [36]

Na obrázku 16 můžeme vidět, že k zhoršení stavu konstrukce došlo z důvodu pronikání vody a jejího zmrazování, což může způsobovat praskání a rozpad konstrukce. Přítomnost rzi na povrchu betonu naznačuje, že ocelová výztuž stále koroduje, což může taky způsobit praskání a rozpad konstrukce. [36]



Obrázek 16 – Rez na povrchu betonu před rekonstrukcí (vlevo) a po rekonstrukci (vpravo) [36]

Z důvodu nekvalitního provedení betonáže nelze důkladně posoudit efektivitu přidání čedičových vláken. [36]

2.2.2 DALŠÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ ČEDIČE VE STAVEBNICTVÍ

2.2.2.1 ČEDIČOVÉ VÝZTUŽNÉ TYČE

Čedičové tyče se jeví jako jedna z vhodných alternativ k nahrazení klasické ocelové betonářské výztuže. Hlavními výhodami jsou vysoká odolnost vůči korozi v kyselém a alkalickém prostředí, vyšší pevnost v tahu a nižší hustota. [30]

Je možné uplatnit je pro posílení a zároveň odlehčení monolitických betonových konstrukcí, základových desek, zpevnění průmyslových podlah, pro rekonstrukci a sanaci budov anebo obecně v silničním a železničním stavitelství. [30]

V České republice je můžeme najít pod názvem ORLITECH BAR u dodavatele Orlimex CZ, s.r.o. Jsou dodávány ve dvou variantách – bez povrchové úpravy a s povrchovou úpravou, kdy jsou tyče před protažením v zapékací formě zasypány křemičitým pískem, co zabezpečí lepší soudržnost s betonem. K dispozici je výztuž o průměru 2,5 – 32 mm a v délce 2 – 12 m. Výztuž s průměrem 4 – 10 mm může být dodávána ve svitcích po 50 – 100 m. [30]

Tabulka 13 – Porovnání vlastností různých typů výztužných tyčí [30, 37]

parametr	kompozitní tyč ROCKBAR (Orlimex)	PREFA Rebar E-CR sklo (Prefa Kompozity)	PREFA Rebar HS uhlík (Prefa Kompozity)	žebírková výztuž B550B
průměr [mm]	4 - 32	5 – 18	5 – 18	6 – 32
pevnost v tahu [MPa]	1300	1050	1700	550
modul pružnosti [MPa]	50 – 55	50	94	210
tepelná vodivost [W _T /m.°C]	0,46	výrobce neuvádí	výrobce neuvádí	56
hustota [g.m ⁻³]	2	2,1	1,7	7,85
elektrická vodivost	nevodivá	nevodivá	nevodivá	vodivá
odolnost proti korozi v alkalickém prostředí	velmi vysoká	výrobce neuvádí	výrobce neuvádí	nízká
požární odolnost [°C]	do 300	výrobce neuvádí	výrobce neuvádí	do 600
magnetická charakteristika	nemagnetická	nemagnetická	nemagnetická	magnetická



Obrázek 17 – Čedičové výztužné tyče [30]



Obrázek 18 – Vyztužení mezipatrové desky pomocí čedičových výztužných tyčí bez změny průměru [30]



Obrázek 19 – Základová deska trojpatrového cihlového bytového domu [30]



Obrázek 20 – Základová deska trojpatrového cihlového bytového domu [30]

2.2.2.2 ČEDIČOVÉ KOMPOZITNÍ SÍTĚ

Kompozitní čedičová síť se skládá z čedičových prutů umístěných ve dvou vzájemně kolmých směrech spojených v kontaktním uzlu speciální hmotou. Mohou být dodávány v listech nebo i navinuty v kotoučích. [30]

Jejich využití je možné u pozemních a inženýrských staveb pro posílení betonových konstrukcí, betonových podlah, cihlových a kamenných zdí, jako výztuha betonových stěnových a sendvičových panelů, pro odlehčení monolitických prvků. Svoje uplatnění najdou i u průmyslové výstavby pro posílení vodních děl, pobřežních konstrukcí a jako výztuha sádrových, anhydritových, či jiných průmyslových podlah. V silničním stavitelství mohou být použity pro vyztužení silničních desek, dálnic, letištních ploch, mostů, zpevnění svahů a také jako oplocení a nekorodující zábrany. [30]

V České republice můžeme tyto sítě najít u dodavatele Orlimex CZ, s.r.o. pod názvem ORLITECH MESH. Jsou složeny z čedičových prutů ORLITECH BAR o průměru 2,2 a 3 mm. [30]

Tabulka 14 – Porovnání vlastností kompozitní a ocelové sítě [30]

parametr	kompozitní síť ROCKMESH 50 x 50 mm	ocelová síť KH 30 100 x 100 mm
průměr [mm]	2,2	4
pevnost v tahu [MPa]	1550	570
tažnost při maximální síle [%]	2,5	2,5
tepelná vodivost [W/m.°C]	0,46	56
plošná hmotnost [g.m ⁻²]	360	2220
elektrická vodivost	nevodivá	vodivá
odolnost proti korozi v alkalickém prostředí	velmi vysoká	nízká
magnetická charakteristika	nemagnetická	magnetická



Obrázek 21 – Aplikace čedičových kompozitních sítí v průmyslové podlaze [30]



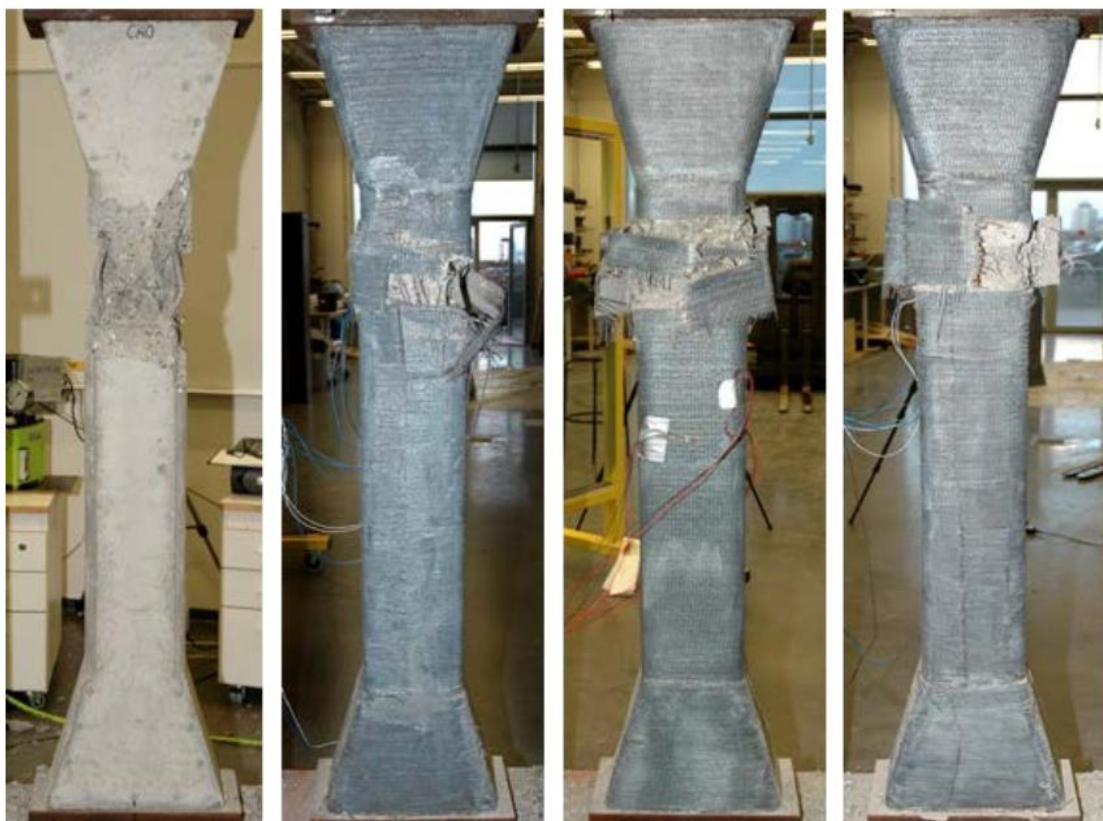
Obrázek 22 – Aplikace čedičových kompozitních sítí v průmyslové podlaze [30]



Obrázek 23 – Aplikace čedičových kompozitních sítí v stěnové monolitické konstrukci
[30]



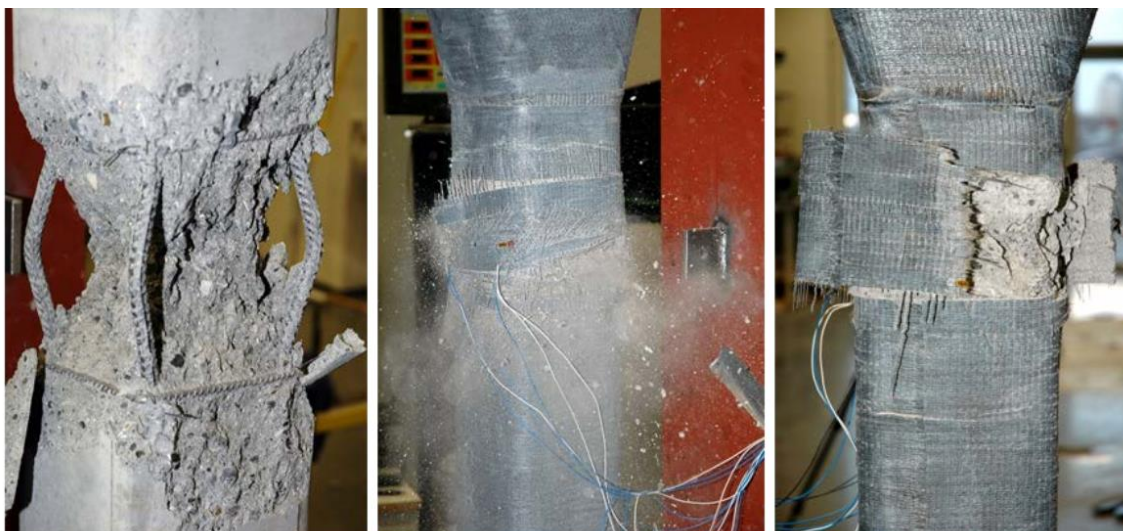
Obrázek 24 – Detail aplikace čedičové kompozitní sítě v stěnové monolitické konstrukci
[30]



Obrázek 25 – Renovace betonového sloupu omotáním čedičovými výztužnými sítěmi [38]



Obrázek 26 – Renovace pilíře omotáním čedičovými výztužnými sítěmi [38]



Obrázek 27 – Renovace betonového sloupu omotáním čedičovými výztužnými sítěmi [38]

2.2.2.3 ČEDIČOVÉ TKANINY

Vyrábí se stejným způsobem jako běžné textilie na speciálních tkacích a pletacích zařízeních. Jsou tkané z rovingů, které jsou tvořeny z přímých a/nebo kroucených přízí. Výrobky mají různou plošnou hmotnost, jsou tkány různými způsoby vazeb. Ve srovnání s netkanou výztuží mají větší obsah vláken, a tedy vyšší tuhost a pevnost. Používají se pro výrobu vrstvených laminátů, v automobilovém a lodním průmyslu, jako výztužné a tepelně-izolační prvky ve stavebnictví. [28,29]



Obrázek 28 – Čedičová tkanina [31]

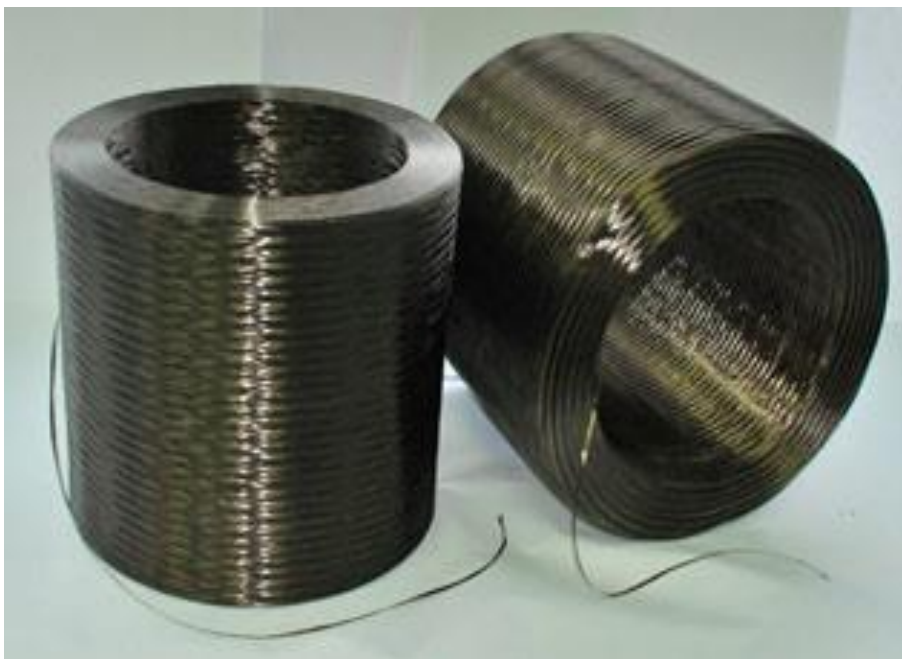
2.2.2.4 ČEDIČOVÉ SVAZKY – ROVINGY

Rovingy jsou svazky kontinuálních jednosměrných čedičových vláken. Existuje více druhů rovingů – přímé, pravidelně uspořádané a vysokovýkonné. [28]

Přímý roving (*DIRECT ROVING*) je spojitý pramen vyrobený procesem tažení. Prodává se navinutý na cívkách a jeho hlavními výhodami jsou velmi dobré estetické vlastnosti bez zakroucení. Používají se hlavně k výrobě tkanin a výztužných sítí. [28]

Pravidelně uspořádaný roving (*REGULAR ASSEMBLED ROVING*) je sestavený z více pramenů, které jsou spojené bez obtáčení. Rovněž se dodávají navinuty na cívkách s vnitřním nebo vnějším odvíjením. [28]

Vysokovýkonný roving (*HIGH PERFORMANCE ASSEMBLED ROVING*) je sestaven tak, že při výrobním procesu jsou prameny impregnovány speciálním lepidlem, které vytváří tvar pásu. Dodávají se s vnitřním nebo vnějším odvíjením. [28]



Obrázek 29 – Přímý roving [28]



Obrázek 30 – Pravidelně uspořádaný roving [28]



Obrázek 31 – Vysokovýkonný roving [28]

2.2.2.5 ČEDIČOVÉ ROHOŽE Z NETKANÉ TEXTÍLIE

Čedičové rohože jsou vyráběny technologií jehlového vpichování bez pojiva na rozdíl od tepelněizolačních rohoží s chemickými pojivy. Základním materiálem jsou monofilamenty, a proto jsou výsledné rohože pružné, nesmršťují se, nedeformují a snadno přiléhají k podkladu. [28]

2.2.2.6 KROUCENÉ ČEDIČOVÉ PŘÍZE

Kroucené čedičové příze se používají hlavně pro další zpracování – hlavně pro výrobu tkanin, pásů a rohoží. Dodávají se navinuté na cívce v krabicích nebo na paletách. [28]



Obrázek 32 – Kroucená čedičová příze [28]

2.2.2.7 ČEDIČOVÁ MINERÁLNÍ VLNA

Minerální vlna patří k nejrozšířenějším tepelně izolačním materiálům a její největší předností je vysoká požární odolnost – při klasifikaci reakce na oheň vyhoví třídě A1. Dělíme je na zatížené a nezatížené minerálně vláknité výrobky. [42]

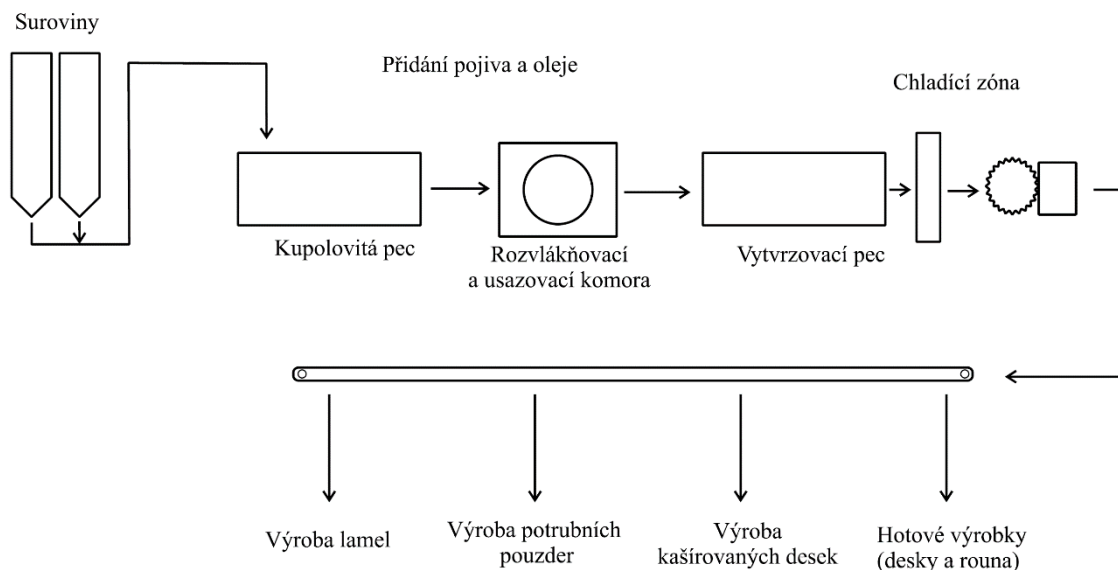


Obrázek 33 – Minerální čedičová vlna od výrobce ISOVER [43]

Při výrobě je základní surovina – čedičová hornina – spolu s tavidly roztavena v kupolové peci při teplotě kolem 1500 °C. Vzniklá tavenina je vypouštěna na rotující válce, které ji odstředivou silou rozstříkují na malé kapičky, jež odlétávají do usazovací komory. Kapky se během toho vlivem velké rychlosti natáhnou a vzniká jemné vlákno tloušťky několik mm. [42]

Do tohoto vlákna se následně vstříkují pojivo, vodoodpudivé přísady – hydrofobizační olej, protiplísňové a jiné přísady. Vlákno se rovnoměrně usadí na pás a pokračuje do vytvrzovací pece, kde se spolu s pojivem a všemi přísadami teplem vytvrzuje. Ve vytvrzovací peci dochází k vytvrzení vrstvy a zhutnění minerální vlny pomocí přítlačných válců na požadovanou objemovou hmotnost. [42]

V poslední fázi se materiál ochladí v chladicí komoře a nařeže se diamantovou pilou na desky nebo rohože. [42]



Obrázek 34 – Blokové schéma výroby minerální vlny [42]

Součinitel tepelné vodivosti čedičové minerální vlny se pohybuje kolem $0,032 - 0,050 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ v závislosti na objemové hmotnosti. [42]

2.2.2.8 ODPADNÍ ČEDIČOVÉ VLÁKNO

Ve Výzkumném ústavu stavebních hmot v Brně ve spolupráci se společnostmi Strojírny Olšovec a Marshal Logistic byla zkoumána možnost využití vláknového odpadu při aplikacích do betonu. Zaměřili se na odpad z výroby minerální vlny – čedičová a skleněná vlákna ve formě odřezků z minerální rohože po jejím vytvrzení a odpadní vláknitý materiál vzniklý v procesu výroby před vstupem do vytvrzovací pece. [39]

Před aplikací do betonu byl materiál upraven na strojní lince sestavené a optimalizované přímo pro úpravu tohoto typu materiálu. Úprava odpadní vlny sestávala z rozvláknění, rozčesání, separace minerální vlny na vlákno a zbytky skloviny, rozplavení – separace vlákna a skloviny a třídění zrn a vláken minerální vlny podle velikosti zrn. [39]



Obrázek 35 – Znečištěné zbytky odpadní čedičové (vlevo) a skelné (vpravo) vlny [39]



Obrázek 36 – Upravená a přečištěná čedičová (vlevo) a skleněná (vpravo) vlna [39]

2.2.2.8.1 EKOLOGICKÁ VHODNOST ODPADNÍHO ČEDIČOVÉHO VLÁKNA

Z hlediska ekologické vhodnosti byla provedena analýza obsahu nebezpečných látek ve výluhu a v sušině a zkoumána ekotoxicita a radioaktivita. Ekotoxicita a radioaktivita byla stanovena dle Vyhlášky č. 294/2005. Množství přečištěné vlny je třeba posoudit z ekologického hlediska z důvodu překročení limitních hodnot arsenu, kadmia a chrómu. [39]

Tabulka 15 – Vstupní analýza odpadních zbytků čedičové a skelné vlny [39]

druh vlny	stanovení škodlivých látek		ekotoxicita	radioaktivita	objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
	ve výluhu	v sušině			
čedičová	splňuje limit I (inertní)	překročení limitních hodnot As, Cd, Cr	vyhovuje	vyhovuje	102
skleněná			vyhovuje	vyhovuje	226

2.2.2.8.2 TECHNOLOGICKÁ VHODNOST ODPADNÍHO ČEDIČOVÉHO VLÁKNA

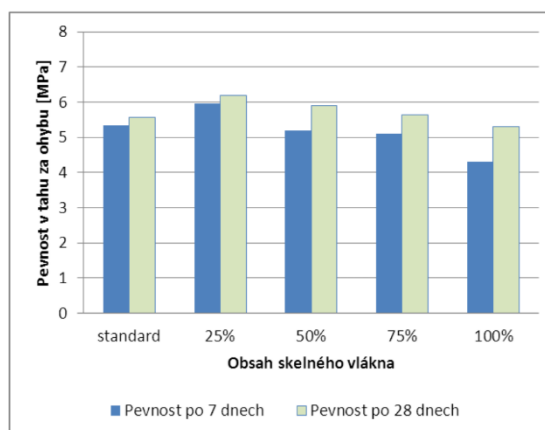
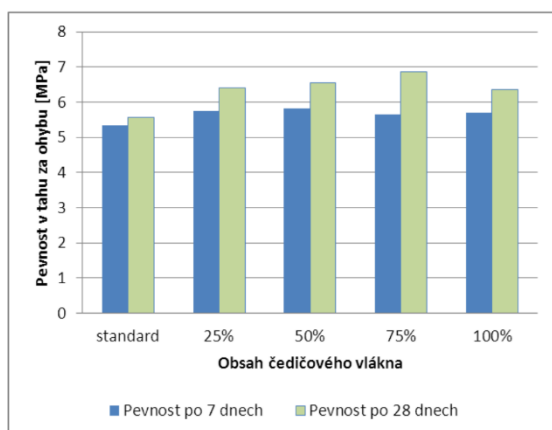
Na zavlhých betonových směsích pro vibrolisované zděné prvky byla ověřena technologická vhodnost použití odpadních vláken. Namíchány byly 4 receptury s přídavkem čedičových a skleněných vláken o přídavku 25, 50, 75 a 100 % objemově. Konzistence namíchání betonové směsi byla velmi suchá o vodním součiniteli 0,3 – 0,36 s maximálním zrnem kameniva 8 mm. [39]

Tabulka 16 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti betonů s čedičovými vlákny po 28 dnech zrání [39]

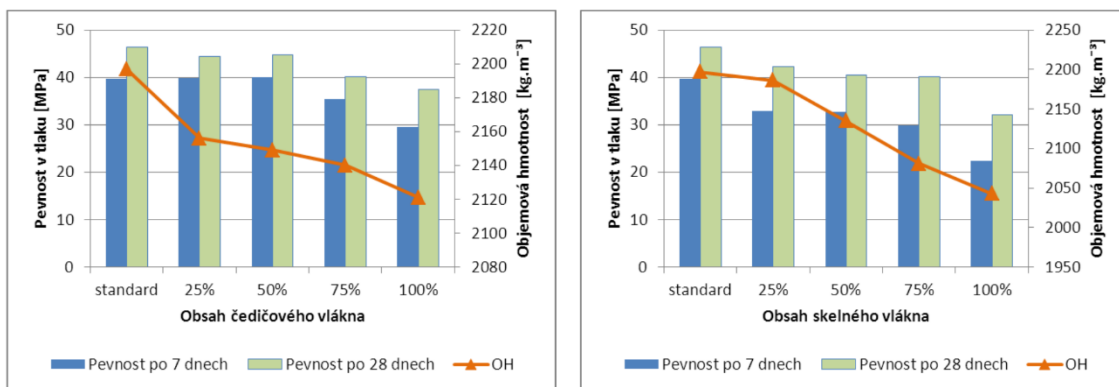
parametr	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
objemová hmotnost [kg.m^{-3}]	2290	2250	2240	2230	2215
pevnost v tahu ohybem [MPa]	5,43	6,41	6,54	6,86	6,35
pevnost v tlaku [MPa]	46,31	44,49	44,74	40,15	37,42
vlhkost [%]	3,00	3,08	3,17	3,18	3,24
nasákavost [%]	4,97	5,46	5,70	5,95	6,69
počáteční nasákavost [$\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$]	1,48	1,80	2,13	2,24	2,40

Tabulka 17 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti betonů se skleněnými vlákny po 28 dnech zrání [39]

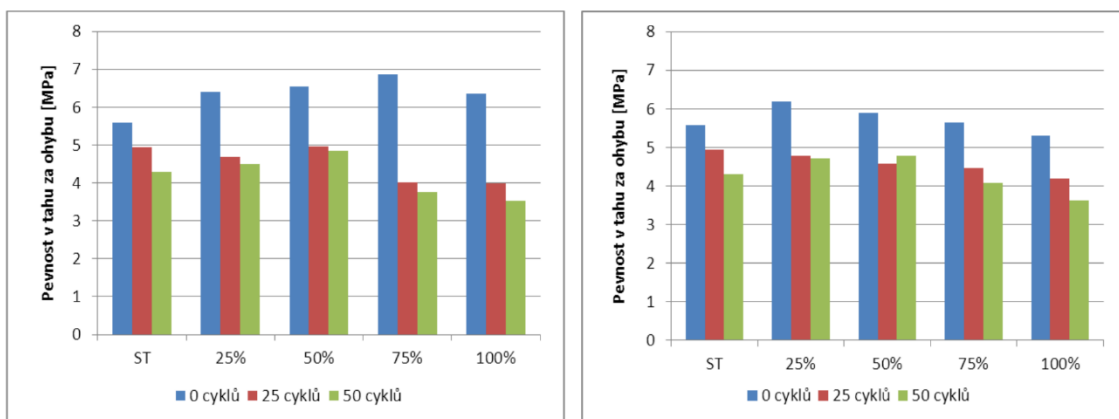
parametr	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
objemová hmotnost [kg.m^{-3}]	2290	2245	2220	2160	2120
pevnost v tahu ohybem [MPa]	5,43	6,2	5,9	5,6	5,3
pevnost v tlaku [MPa]	46,31	42,33	40,50	40,17	32,1
vlhkost [%]	3,00	3,20	3,41	3,70	4,20
nasákavost [%]	4,97	6,0	6,8	7,4	8,8



Graf 6 – Závislost pevnosti v tahu ohybem po 7 a 28 dnech na obsahu čedičového/skelného vlákna [39]



Graf 7 – Závislost pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech a objemové hmotnosti na obsahu čedičového/skelného vlákna [39]



Graf 8 – Vyhodnocení zkoušek mrazuvzdornosti po 0, 25 a 50 cyklech u směsí s různým obsahem čedičového/skelného vlákna [39]

Sada zkušebních těles byla podrobena zkoušce mrazuvzdornosti založené na stanovení míry porušení trámů po zkoušce střídavého zmrazování a rozmrazování vodou nasycených trámů. Po 25 a 50 cyklech byly trávce podrobeny zkoušce pevnost v tahu ohybem a tlaku. Dle indexu mrazuvzdornosti (poměr pevností v tlaku po zkoušce k hodnotě pevnosti v tlaku před zkouškou) vyhoví směsi s obsahem skelného i čedičového vlákna do 50 % objemově. [39]

2.2.2.8.3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ ODPADNÍHO ČEDIČOVÉHO VLÁKNA

Z dosavadních výsledků laboratorních testů lze konstatovat, že využití odpadu z výroby minerálních vláken pro vibrolisované prvky je možné a žádoucí. Fyzikálně-mechanické vlastnosti hmoty nebyly vlivem rostoucího přírůstku odpadního minerálního vlákna zásadně ovlivněny. Přídavkem vlákna do betonové směsi došlo ke zvýšení pevnosti v tahu ohybem – u čedičového vlákna až do výše 100 % přírůstku, u skelného vlákna

do výše 50 % přídatku. Ve srovnání se standardním betonem vykazovaly nejlepší pevnost v tlaku zkušební vzorky s maximálním obsahem 50 % obj. čedičového vlákna. [39]

Pevnosti v tlaku betonu s obsahem skelného vlákna jsou nepatrně nižší ve srovnání s betony s obsahem vlákna čedičového. Betony s obsahem skelného vlákna mají nižší objemovou hmotnost ve srovnání s betony s obsahem čedičového vlákna. Nasákavost betonu s obsahem skelného vlákna je vyšší ve srovnání s betony s obsahem vlákna čedičového. [39]

Hlavním ekonomickým přínosem je využití odpadního materiálu v co nejvyšším možném obsahu, je tedy možné docílení finanční úspory spojené s užitnou hodnotou výrobku. Předpokládá se navýšení množství vyrobených tvarovek z jedné záměsi o cca 10 – 15 %. Z hlediska požadovaných pevnostních charakteristik, nasákavosti a mrazuvzdornosti se jeví jako nejvíc vhodný přírdek do betonové směsi ve výš 25 % hmotnostních. [39]

2.3 VYBRANÍ DODAVATELÉ ČEDIČOVÝCH VLÁKEN V ČESKÉ REPUBLICE

2.3.1 ORLIMEX CZ, s.r.o.

Společnost nabízí dva druhy kompozitních materiálů – materiály z čedičového vlákna a ze sklolaminátového vlákna. Produkty jsou vyrobeny ruskou firmou GALEN. Co se týče čedičových výrobků, v jejich nabídce můžeme najít kompozitní sítě, výztužné tyče a krátká čedičová vlákna o průměrech 9,13 a 17 μm v délkách 6, 12, 18, 24 a 30 mm. [30]

Podrobné informace jsou uvedeny na webové stránce dodavatele <http://www.orlimex.cz/>. [30]

2.3.2 BASALTEX, a.s.

Společnost je exportérem celého sortimentu čedičových vláken od ruského výrobce KAMENNY VEK, v jehož nabídce najdeme krátká čedičová vlákna o průměru 9 – 12 μm , nekonečné vlákno i textilie a tkaniny. [35]

Podrobné informace jsou uvedeny na webové stránce dodavatele <http://www.basaltex.cz/>. [35]

2.4 VYBRANÍ VÝROBCI ČEDIČOVÝCH VLÁKEN VE SVĚTĚ

- KAMENNY VEK (RUSKO) - <http://basfiber.com/> [28]
- GALEN (RUSKO) – <http://galencomposite.com/> [40]
- TECHNOBASALT (UKRAJINA) – <http://technobasalt.com/> [41]

Uvedení výrobci čedičových vláken a dalších produktů z čediče vyrábí obdobný sortiment výrobků – jejich vlastnosti jsou srovnatelné.

3 CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo ověření chování betonu s přídavkem krátkých čedičových vláken. Byl připraven cementový kompozit s čedičovými vlákny v dávce 3, 10 a 20 kg.m⁻³, který byl porovnán s referenčními vzorky z prostého betonu. V průběhu míchání směsí bylo vizuálně posouzeno rozptýlení vláken v čerstvém betonu, konzistence byla zjištěna zkouškou sednutí kužele. V čerstvém betonu byl zjištěn obsah vzduchu a objemová hmotnost čerstvé směsi. Na tělesech o stáří 28 dnů byla zjištěna objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu, pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku a pevnost v příčném tahu. Přítomnost čedičových vláken v kompozitu byla dokumentována pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu.

4 METODIKA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

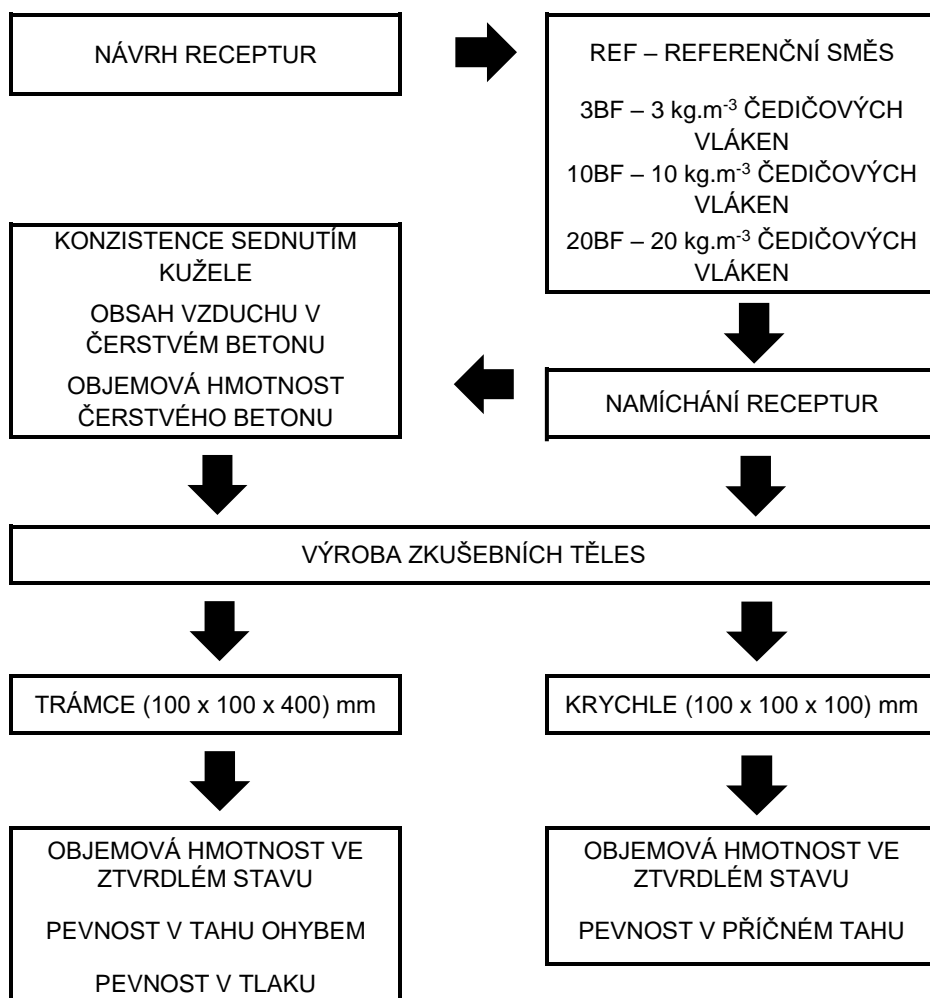
4.1 TEORETICKÝ ROZBOR ŘEŠENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Na základě informací zpracovaných v teoretické části bakalářské práce jsem navrhla ověření chování betonů s přidavkem krátkých čedičových vláken. V odborných textech použitých v předešlé části se uvádí, že s přidavkem těchto vláken se snižuje zpracovatelnost betonové směsi, zvyšuje se pevnost v tahu ohybem i pevnost v tahu.

4.2 NÁVRH PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK

Navrhla jsem složení receptur – referenční směs a receptury s přidavkem 3, 10 a 20 kg.m⁻³ čedičových vláken. Zvolila jsem si počet a druh zkušebních těles a druh prováděných zkoušek – viz schéma práce níže.

4.2.1 SCHÉMA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI



4.2.2 POPIS PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK

4.2.2.1 KONZISTENCE ČERSTVÉHO BETONU – ZKOUŠKA SEDNUTÍM

Konzistence čerstvého betonu byla stanovena normovým postupem dle ČSN EN 12 350 2: „Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím“. [44]

Podstatou zkoušky je naplnění Abramsova kužele čerstvým betonem ve třech vrstvách. Každá vrstva musí být zhutněna v celém průřezu 25 vpichy propichovací tyčí. Následně se kužel zvedne a změří se vzdálenost, o kterou poklesl beton vzhledem k výšce komolého kužele. Podle této hodnoty se konzistence zařadí do třídy konzistence dle tabulky 24. [44]

Tabulka 18 – Třídy konzistence u zkoušky sednutím [44]

třída konzistence	sednutí kužele [mm]
S1	10 – 40
S2	50 – 90
S3	100 – 150
S4	160 – 210
S5	≥ 220

4.2.2.2 OBJEMOVÁ HMOTNOST ČERSTVÉHO BETONU

Podstatou zkoušky je zvážení nádoby o známém objemu, její naplnění a následné zvážení nádoby naplněné čerstvým betonem. Objemová hmotnost se stanoví dle níže uvedeného vztahu a zaokrouhlí se na nejbližších 10 kg.m⁻³.

$$D_{\text{čB}} = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

$D_{\text{čB}}$ – objemová hmotnost čerstvého betonu [kg.m⁻³]

m_2 – hmotnost prázdné nádoby [kg]

m_1 – hmotnost naplněné nádoby [kg]

V – objem nádoby [m³]

4.2.2.3 OBSAH VZDUCHU V ČERSTVÉM BETONU

Obsah vzduchu byl stanoven tlakoměrnou metodou podle normy ČSN EN 12 350-7: „Obsah vzduchu – Tlakové metody“. [45]

Nádoba se naplní ve 3 vrstvách, přičemž každá vrstva je zhutněna 25 vpichy propichovací tyčí. Po zhutnění každé vrstvy je nutné poklepat paličkou na stěny nádoby

k vypuzení vzduchových bublin. Zhutněný beton v nádobě se zarovná propichovací tyčí, uhladí se povrch a nasadí se neprodyšně víko. [45]

Uzavře se hlavní ventil pro přívod vzduchu a otevřou se ventily A a B. Pryžovou stříčkou se voda vstříkuje do ventilu A nebo B tak dlouho, dokud nevytéká z druhého ventilu. Paličkou se lehce poklepe na přístroj, aby se odstranily vzduchové bubliny. Ventil na vypouštění vzduchu ze vzduchové komory se uzavře a pumpuje se do ní vzduch, dokud ručička tlakoměru neukazuje počáteční hodnotu tlaku. Ventily A a B se uzavřou a otevře se hlavní ventil vzduchu. Ostře se poklepe na boční stěny nádoby a za lehkého poklepávání na tlakoměr se odečte hodnota tlaku na tlakoměru. [45]

Tato hodnota odpovídá objemu obsaženého vzduchu v procentech. Před sejmutím víka se otevřou ventily A a B, aby se uvolnil tlak. [45]

4.2.2.4 OBJEMOVÁ HMOTNOST VE ZTVRDLÉM STAVU

Podstata zkoušky spočívá ve zvážení vzorků a změření všech jejich rozměrů. Objemová hmotnost se stanoví dle níže uvedeného vztahu a zaokrouhlí se na nejbližších 10 kg.m⁻³.

$$D_{zB} = \frac{m}{V}$$

D_{zB} – objemová hmotnost zkušební tělesa [kg.m⁻³]

m – hmotnost zkušební tělesa [kg]

V – objem zkušební tělesa [m³]

4.2.2.5 PEVNOST V TAHU OHYBEM

Pevnost v tahu ohybem byla stanovena podle ČSN EN 12 390-5: „Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. [46]

Zkouška byla prováděna na trémciích o rozměrech (100 x 100 x 400) mm.

Podstatou zkoušky je zatěžování trémce ohybovým momentem, který je vyvozen od zatížení přenášeného prostřednictvím spodních a horních podpěrných válečků. Tělesa jsou do lisu vložena kolmo na směr ukládání betonu. Maximální zatížení se zaznamená, pevnost v tahu ohybem se vypočte dle níže uvedeného vzorce a zaokrouhlí se na 0,1 MPa. [46]

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

f_{cf} – pevnost v tahu ohybem [MPa]

F – maximální zatížení při porušení [N]

l – vzdálenost podpěrných válečků [mm]

d_1, d_2 – rozměry příčného řezu tělesa [mm]

4.2.2.6 PEVNOST V TLAKU

Pevnost v tlaku byla stanovena podle normy ČSN EN 12 390-3: „Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. [47]

Zkouška byla prováděna na zlomcích z trámů z předchozí zkoušky pevnost v tahu ohybem.

Podstatou zkoušky je zatěžování těles ve zkušebním lisu konstantní rychlostí až do jejich porušení. Tělesa jsou do lisu vložena kolmo na směr ukládání betonu. Maximální zatížení při porušení se zaznamená, pevnost v tlaku se vypočte dle níže uvedeného vzorce a zaokrouhlí se na 0,1 MPa. [47]

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

f_c – pevnost v tlaku [MPa]

F – maximální zatížení při porušení [N]

A_c – průřezová plocha zkušebního tělesa [mm²]

4.2.2.7 PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU

Pevnost v příčném tahu byla stanovena podle ČSN EN 12 390-6: „Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. [48]

Zkouška byla prováděna na krychlích o hraně 100 mm.

Podstatou zkoušky je zatěžování zkušebního tělesa konstantní rychlostí v lisu a jeho vystavení tlaku v úzkém pruhu po jeho délce za použití vodícího přípravku a roznášecích proužků z dřevovláknité desky. Maximální zatížení při porušení se zaznamená, pevnost v tlaku se vypočte dle níže uvedeného vzorce a zaokrouhlí se na 0,05 MPa. [48]

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}$$

f_{ct} – pevnost v příčném tahu [MPa]

F – maximální zatížení při porušení [N]

L – délka dotykové přímky tělesa [mm]

d – zjištěný příčný rozměr tělesa [mm]

4.3 ZHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Finálním krokem je zhodnocení dosažení výsledků experimentální části a porovnání je s teoreticky zjištěnými informacemi v odborných textech.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 CHARAKTERISTIKY VSTUPNÍCH SUROVIN

5.1.1 CEMENT

Byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R od výrobce Českomoravský cement, a.s. ze závodu Mokrá.

Mezi jeho charakteristické vlastnosti patří rychlý nárůst pevností, vysoká počáteční pevnost, vysoká konečná pevnost, rychlý vývin hydratačního tepla a zároveň vyšší celkové hydratační teplo. [32]

Tabulka 19 – Chemické vlastnosti [32]

složka	průměrná hodnota [%]
CaO	64,2
SiO ₂	19,5
Al ₂ O ₃	4,7
Fe ₂ O ₃	3,2
MgO	1,3
SO ₃	3,2
Cl ⁻	0,047
K ₂ O	0,78
Na ₂ O	0,09
Na ₂ O ekvivalent	0,6
nerozpustný zbytek	0,8
ztráta žháním	3,2

Tabulka 20 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti [32]

parametr	průměrná hodnota
pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	61
pevnost v tahu ohybem po 28 dnech [MPa]	9
počátek tuhnutí [min]	219
konec tuhnutí [min]	286
objemová stálost (Le Chatelier) [mm]	0,8
měrný povrch (Blaine) [m ² .kg ⁻¹]	374
měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	3110
hydratační teplo 7 dní [J.g ⁻¹]	310

5.1.2 KAMENIVO

- drobné těžené kamenivo DTK 0-4 Žabčice
- hrubé drcené kamenivo HDK 4-8 Olbramovice
- hrubé drcené kamenivo HDK 8-16 Olbramovice

5.1.3 VODA

Pro namíchání všech receptur byla použita pitná voda z vodovodu areálu VUT Brno, fakulta stavební. Voda splňuje normu ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu.

5.1.4 SUPERPLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADA

Byla použita superplastifikační přísada CHRYSO Fluid Optima 224 na bázi modifikovaných polykarboxylátů.

Vyazuje silnou schopnost redukovat množství vody, prodloužit dobu zpracovatelnosti betonu a je vhodná pro transportbeton, betony pro inženýrské stavby, vysokopevnostní a vysokojakostní betony, betony velmi měkké a tekuté a pro samozhutnitelné betony. Doporučené dávkování se pohybuje v rozmezí od 0,3 kg do 2,0 kg na 100 kg cementu. [33]

5.1.5 ČEDIČOVÁ VLÁKNA

V recepturách 3BF, 10BF a 20BF byla použita čedičová vlákna KESTON BAZALT o průměru 20 μm , délky 24 mm od dodavatele Techno-Wato Kft., od ukrajinského výrobce TECHNOBASALT ve formě rozptýlené výztuže. [34]

Výrobce uvádí, že dobře odolávají chemikáliím a jsou stabilní v prostředí s pH 4 – 13. Dobře odolávají tepelnému namáhání a zlepšují odolnost vůči teplotním šokům. Přidání těchto vláken zabraňuje vzniku smršťovacích trhlin a zlepšuje schopnost konstrukce odolávat dynamickým nárazům. Rovněž uvádí, že vlákna zvyšují trvanlivost, houževnatost konstrukce a zlepšují počáteční i konečné pevnosti v tahu ohybem. Výhodou v porovnání s ocelovými vlákny je jejich nižší hmotnost a odolnost vůči korozi. Čedičová vlákna jsou odolná vůči UV záření a zásadám, jsou nehořlavá a jejich teplotní interval použití je v rozmezí - 200 °C a 600 °C. [34]



Obrázek 37 – Použitá čedičová vlákna výrobce TECHNOBASALT

Tato krátká čedičová vlákna mohou být použita v téměř jakýchkoliv monolitických i prefabrikovaných betonových a železobetonových konstrukcích. Díky svojí tepelné odolnosti mohou být úspěšně využity pro asfaltové a bitumenové směsi. Své využití najdou i v oblasti jaderné energetiky nebo elektrotechnickém průmyslu. [34]

Vlákna se běžně přidávají do suché směsi nebo do předpřipravené maltové směsi zabalené v pytlích. Doporučené dávkování je 2 kg.m^{-3} při době míchání 2 – 4 minuty do dosáhnutí rovnoměrného rozptýlení vláken v čerstvé směsi. [34]

Tabulka 21 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti použitých čedičových vláken [34]

parametr	jednotka	hodnota
vzhled	-	šedivé, nazelenalé a černé hedvábné vláknové útržky
délka	[mm]	12 – 600 mm dle potřeby (běžně 24, 36, 50, 100 mm)
průměr	[μm]	20
hustota	[g.cm^{-3}]	2,1
odolnost ve vodě	-	nepodléhá hydrolýze
odolnost vůči chemikáliím	-	pH 4 – 13
tepelná odolnost	[°C]	+ 982 °C
tepelná vodivost	-	nevodivé, nezmagnetizovatelné

5.2 RECEPTY

Všechny směsi se skládaly z hrubého drceného kameniva frakce 4 – 8 mm a 8 – 16 mm, drobného těženého kameniva frakce 0 – 4 mm, cementu CEM I 42,5 R, vody a superplastifikační přísady. U dalších směsí byly navíc i krátká čedičová vlákna délky 24 mm, a to v dávce 3 kg.m^{-3} (3BF), 10 kg.m^{-3} (10BF) a 20 kg.m^{-3} (20BF).

Tabulka 22 – Složení všech receptur

složka	REF	3BF	10BF	20BF
	[kg.m ⁻³]			
CEM I 42,5 R Mokrá	350	350	350	350
DTK 0 - 4 Žabčice	819	819	819	819
HDK 4 - 8 Olbramovice	220	220	220	220
HDK 8 - 16 Olbramovice	783	783	783	783
voda, w = 0,40	141	141	141	141
superplastifikátor CHRYSO Fluid Optima 224	6,3	6,3	6,3	6,3
čedičová vlákna KESTON BAZALT 24 mm	-	3	10	20

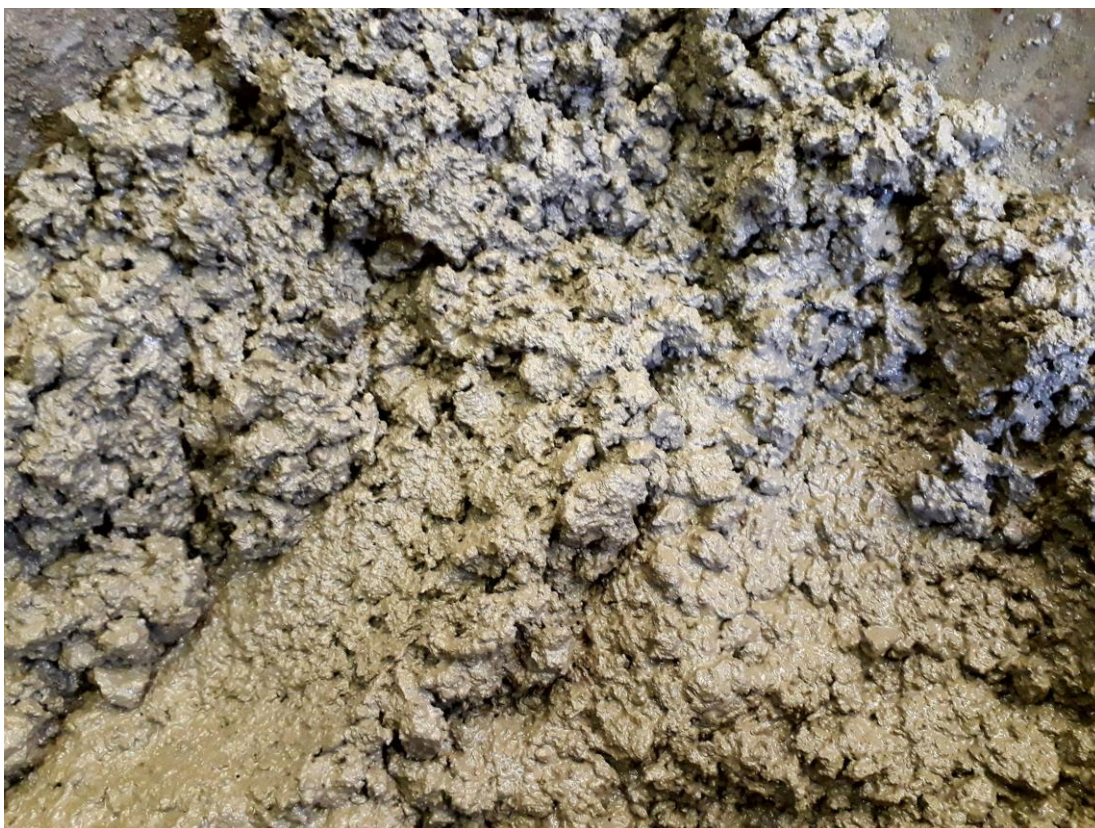
5.3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A JEJICH OŠETŘOVÁNÍ

Betonové směsi byly namíchány v laboratorní míchačce s nuceným oběhem. Do míchačky bylo vloženo hrubé kamenivo, drobné kamenivo, cement. U receptur 3BF, 10BF a 20BF byla do suché směsi přidána i čedičová vlákna. Poslední složkou byla záměsová voda se superplastifikační přísadou.

Konzistence čerstvé betonové směsi byla ověřena pomocí zkoušky sednutí kužele. Z každé směsi bylo vytvořeno 6 zkušebních těles – 3 trámce o rozměrech (100 x 100 x 400) mm a 3 krychle o hraně 100 mm. Směs byla do forem ukládána ve 2 vrstvách a zhutňována pomocí vibračního stolu. Odformovaná tělesa byla následně uložena do vlhkého prostředí po dobu 28 dní.



Obrázek 38 – Směs 3BF



Obrázek 39 – Směs 10BF



Obrázek 40 – Směs 20BF



Obrázek 41 – Směs 20BF

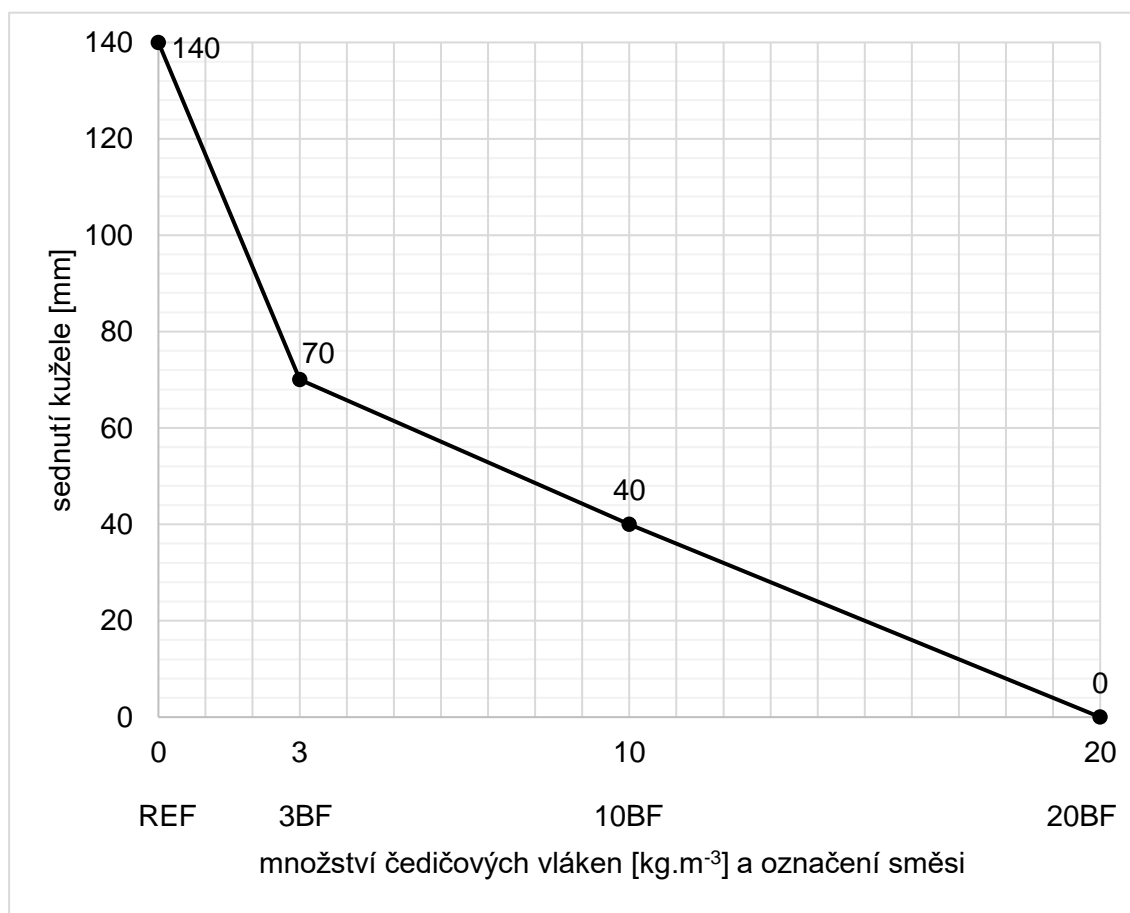
5.4 VÝSLEDKY PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK

5.4.1 VLASTNOSTI BETONU V ČERSTVÉM STAVU

5.4.1.1 KONZISTENCE ČERSTVÉHO BETONU – ZKOUŠKA SEDNUTÍM

Tabulka 23 – Konzistence čerstvého betonu – zkouška sednutím

označení	obsah čedičových vláken [kg.m ⁻³]	sednutí kužele [mm]	třída sednutí kužele
REF	0	140	S3
3BF	3	70	S2
10BF	10	40	S1
20BF	20	0	-



Graf 9 – Závislost konzistence (sednutí kužele) čerstvé směsi na množství čedičových vláken

5.4.1.2 OBJEMOVÁ HMOTNOST ČERTSVÉHO BETONU

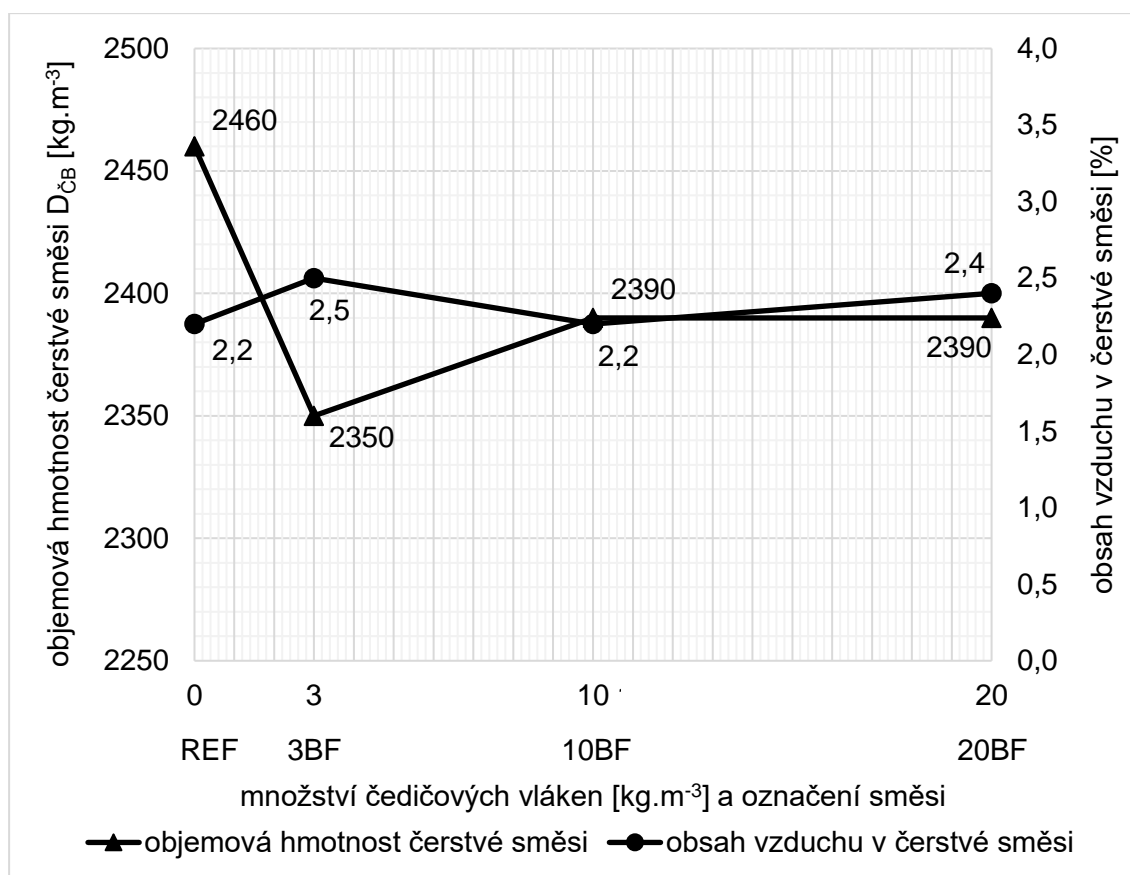
Tabulka 24 – Objemová hmotnost čerstvého betonu

označení	obsah čedičových vláken [kg.m ⁻³]	objemová hmotnost čerstvého betonu D _{čB} [kg.m ⁻³]	průměrná objemová hmotnost čerstvého betonu D _{čB} [kg.m ⁻³]
REF	0	2460	2460
		2450	
		2460	
3BF	3	2380	2350
		2350	
		2320	
10BF	10	2380	2390
		2390	
		2390	
20BF	20	2400	2390
		2390	
		2370	

5.4.1.3 OBSAH VZDUCHU V ČERSTVÉM BETONU

Tabulka 25 – Obsah vzduchu v čerstvém betonu

označení	obsah čedičových vláken [kg.m ⁻³]	obsah vzduchu [%]	průměrný obsah vzduchu [%]
REF	0	2,1	2,2
		2,3	
3BF	3	2,3	2,5
		2,6	
10BF	10	2,0	2,2
		2,4	
20BF	20	2,3	2,4
		2,4	



Graf 10 – Závislost objemové hmotnosti čerstvé směsi a obsahu vzduchu na množství čedičových vláken

5.4.2 VLASTNOSTI BETONU V ZTVRDLÉM STAVU

5.4.2.1 OBJEMOVÁ HMOTNOST BETONU VE ZTVRDLÉM STAVU

Tabulka 26 – Hmotnost a rozměry zkušebních trámů

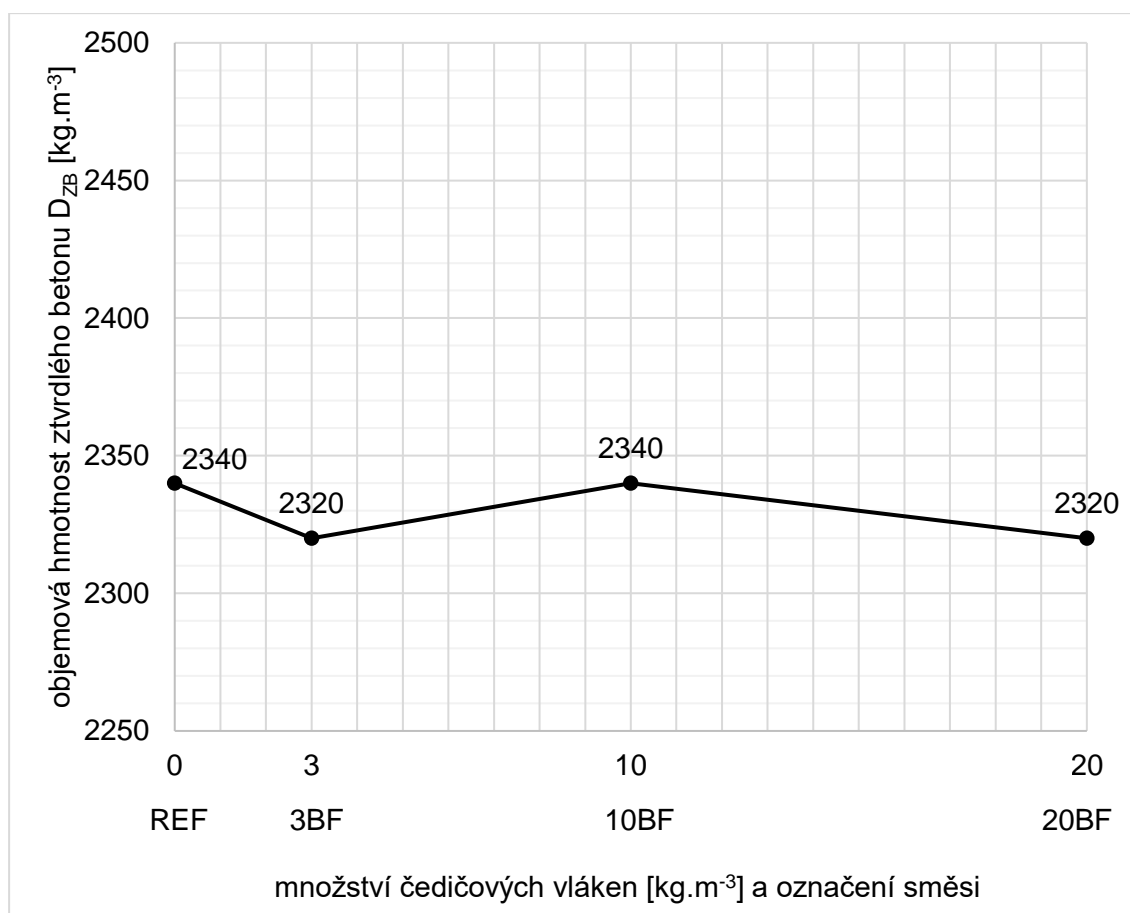
označení		m [kg]	l [mm]	b [mm]	h [mm]
REF	REF-1	9,53	400,25	99,31	102,71
	REF-2	9,47	400,6	99,91	101,46
	REF-3	9,5	400,16	100,66	100,75
3BF	3BF-1	9,225	400,16	99,48	100,24
	3BF-2	9,28	400,16	100,04	100,22
	3BF-3	9,29	400,45	99,42	101,09
10BF	10BF-1	9,465	400,54	100,19	100,26
	10BF-2	9,575	401,43	100,46	101,57
	10BF-3	9,13	400,48	99,91	97,42
20BF	20BF-1	9,345	400,2	100,44	101,53
	20BF-2	9,29	400,59	99,82	99,15
	20BF-3	9,295	400,22	99,93	100,11

Tabulka 27 – Hmotnost a rozměry zkušebních krychlí

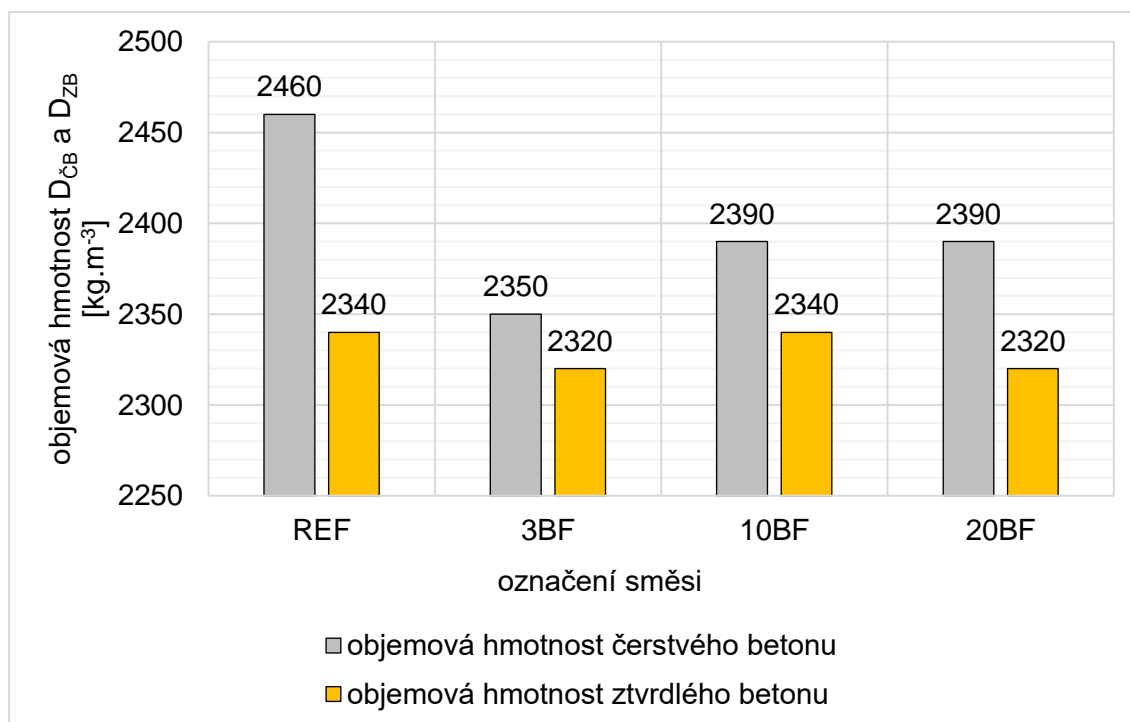
označení		m [kg]	a [mm]	b [mm]	c [mm]
REF	REF-4	2,43	100,49	102,36	101,9
	REF-5	2,42	103,26	100,23	99,9
	REF-6	2,434	100,78	101,01	101,05
3BF	3BF-4	2,312	100,85	99,14	100,29
	3BF-5	2,286	100,83	99,8,96	99,34
	3BF-6	2,294	98,25	99,56	100,64
10BF	10BF-4	2,344	100,08	100,39	100,49
	10BF-5	2,386	100,66	101,06	99,83
	10BF-6	2,29	99,93	99,72	98,01
20BF	20BF-4	2,396	100,94	101,01	100,92
	20BF-5	2,342	100,89	100,92	99,53
	20BF-6	2,354	100,8	100,42	100,45

Tabulka 28 – Objemová hmotnost betonu ve ztvrdlém stavu

označení		typ tělesa	objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu D _{ZB} [kg.m ⁻³]		průměrná objemová hmotnost D _{ZB} [kg.m ⁻³]
REF	REF-1	trámec	2330	2330	2340
	REF-2		2330		
	REF-3		2340		
	REF-4	krychle	2320	2340	
	REF-5		2340		
	REF-6		2370		
3BF	3BF-1	trámec	2310	2310	2320
	3BF-2		2310		
	3BF-3		2310		
	3BF-4	krychle	2310	2320	
	3BF-5		2310		
	3BF-6		2330		
10BF	10BF-1	trámec	2350	2340	2340
	10BF-2		2340		
	10BF-3		2340		
	10BF-4	krychle	2320	2340	
	10BF-5		2350		
	10BF-6		2340		
20BF	20BF-1	trámec	2290	2320	2320
	20BF-2		2340		
	20BF-3		2320		
	20BF-4	krychle	2330	2320	
	20BF-5		2310		
	20BF-6		2320		



Graf 11 – Závislost objemové hmotnosti ztvrdlého betonu na množství čedičových vláken

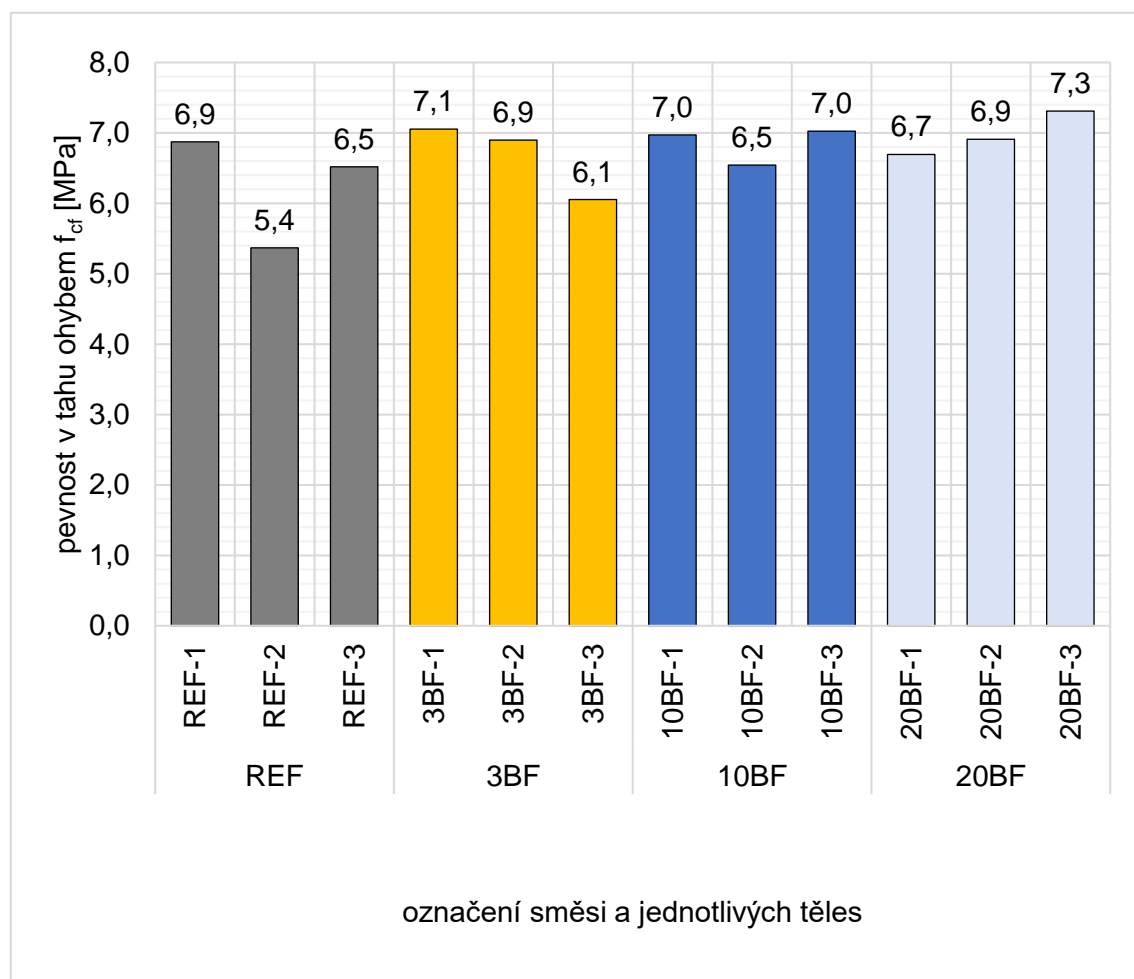


Graf 12 – Porovnání objemových hmotností čerstvého a ztvrdlého betonu po 28 dnech

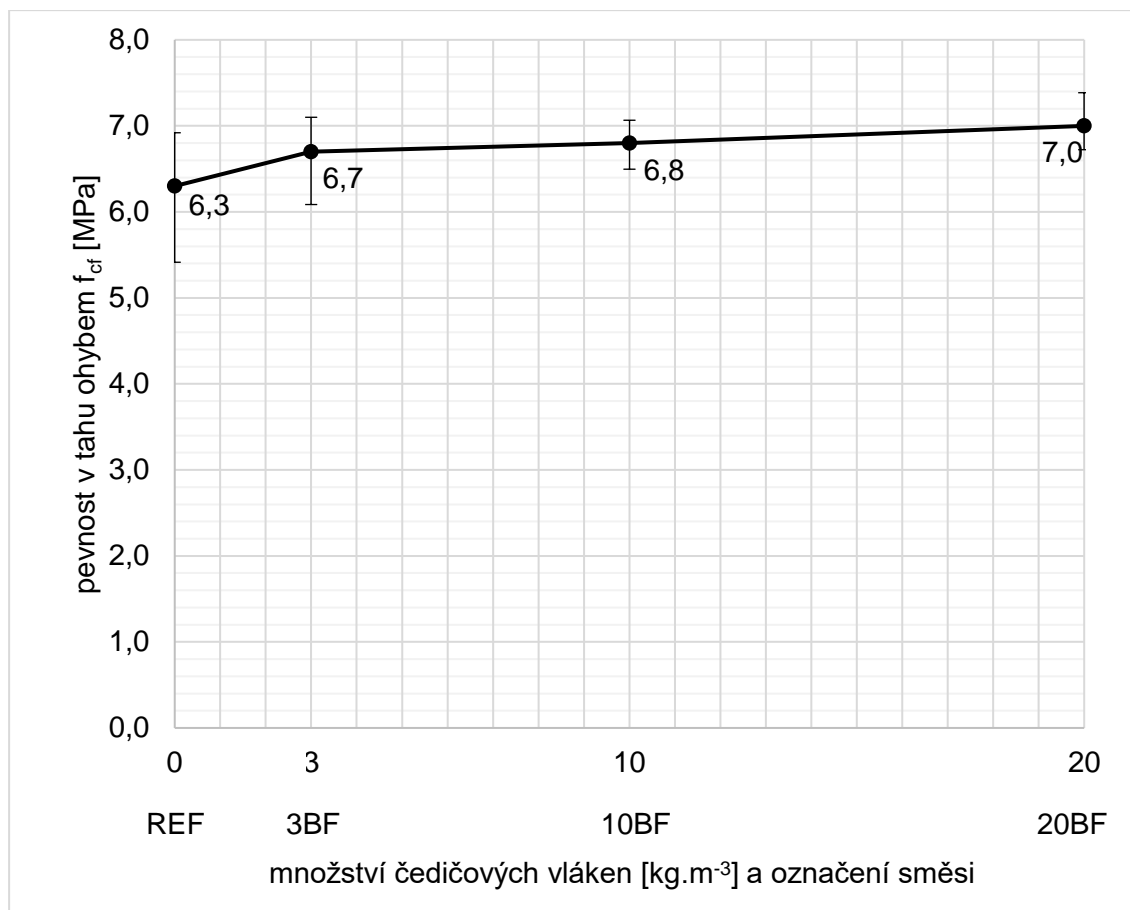
5.4.2.2 PEVNOST V TAHU OHYBEM

Tabulka 29 – Pevnost v tahu ohybem

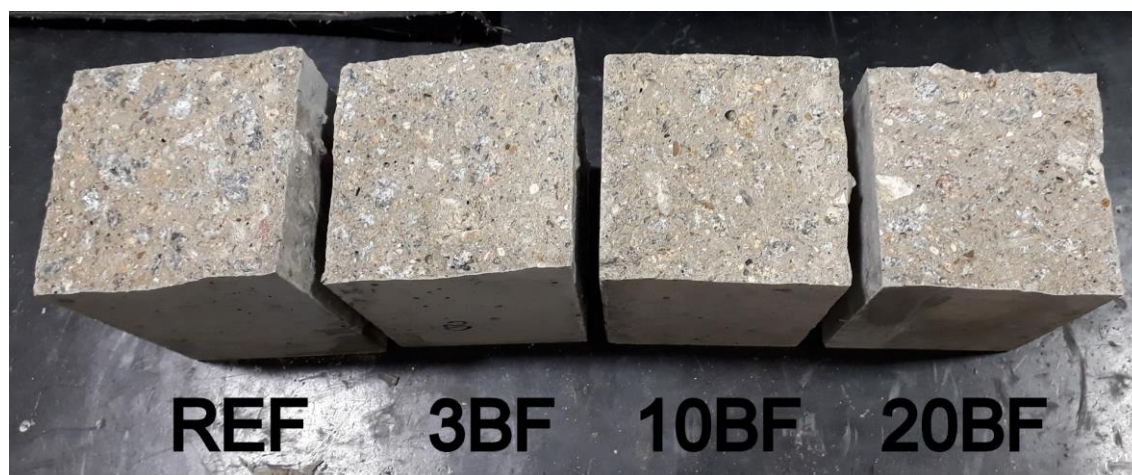
označení		F_{cf} [kN]	f_{cf} [MPa]	$\bar{\sigma} f_{cf}$ [MPa]
REF	REF-1	24,0	6,9	6,3
	REF-2	18,4	5,4	
	REF-3	22,2	6,5	
3BF	3BF-1	23,5	7,1	6,7
	3BF-2	23,1	6,9	
	3BF-3	20,5	6,1	
10BF	10BF-1	23,4	7,0	6,8
	10BF-2	22,6	6,5	
	10BF-3	22,2	7,0	
20BF	20BF-1	23,1	6,7	7,0
	20BF-2	22,6	6,9	
	20BF-3	24,4	7,3	



Graf 13 – Porovnání pevností v tahu ohybem u jednotlivých zkušebních těles



Graf 14 – Závislost průměrných hodnot pevností v tahu ohybem na množství čedičových vláken

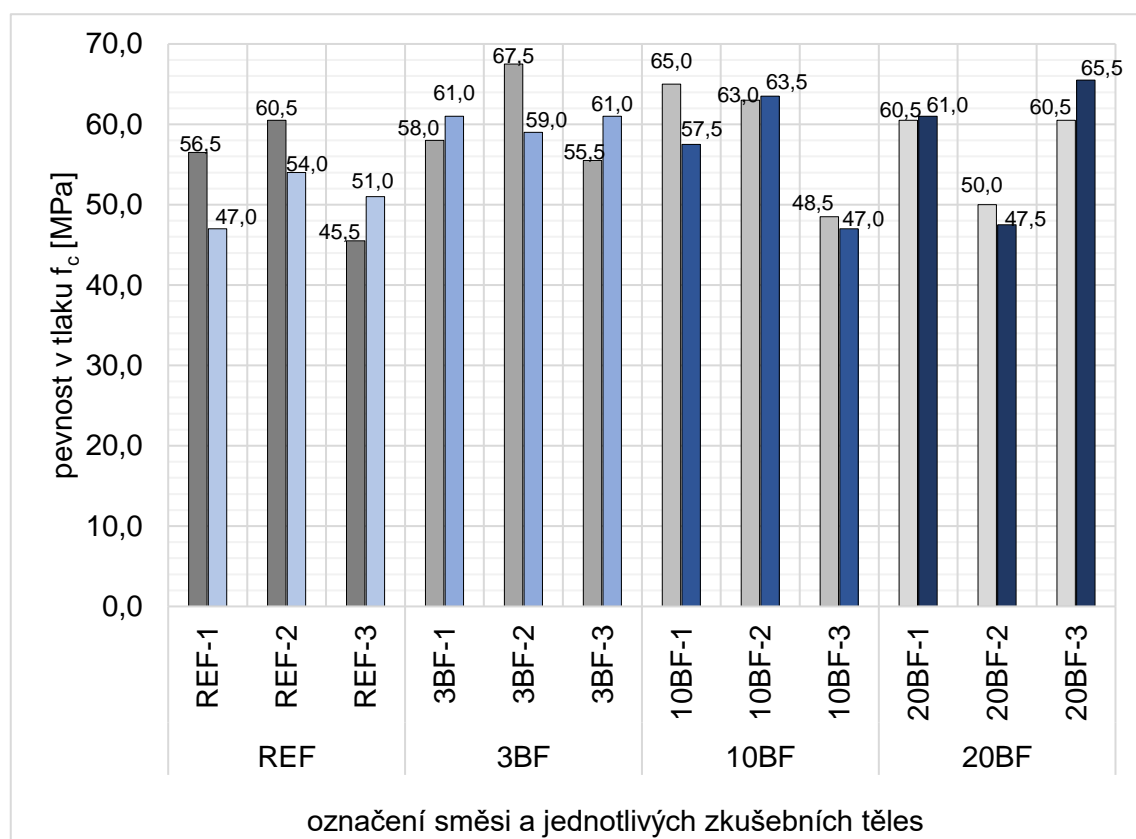


Obrázek 44 – Zkušební tělesa po zkoušce v tahu ohybem

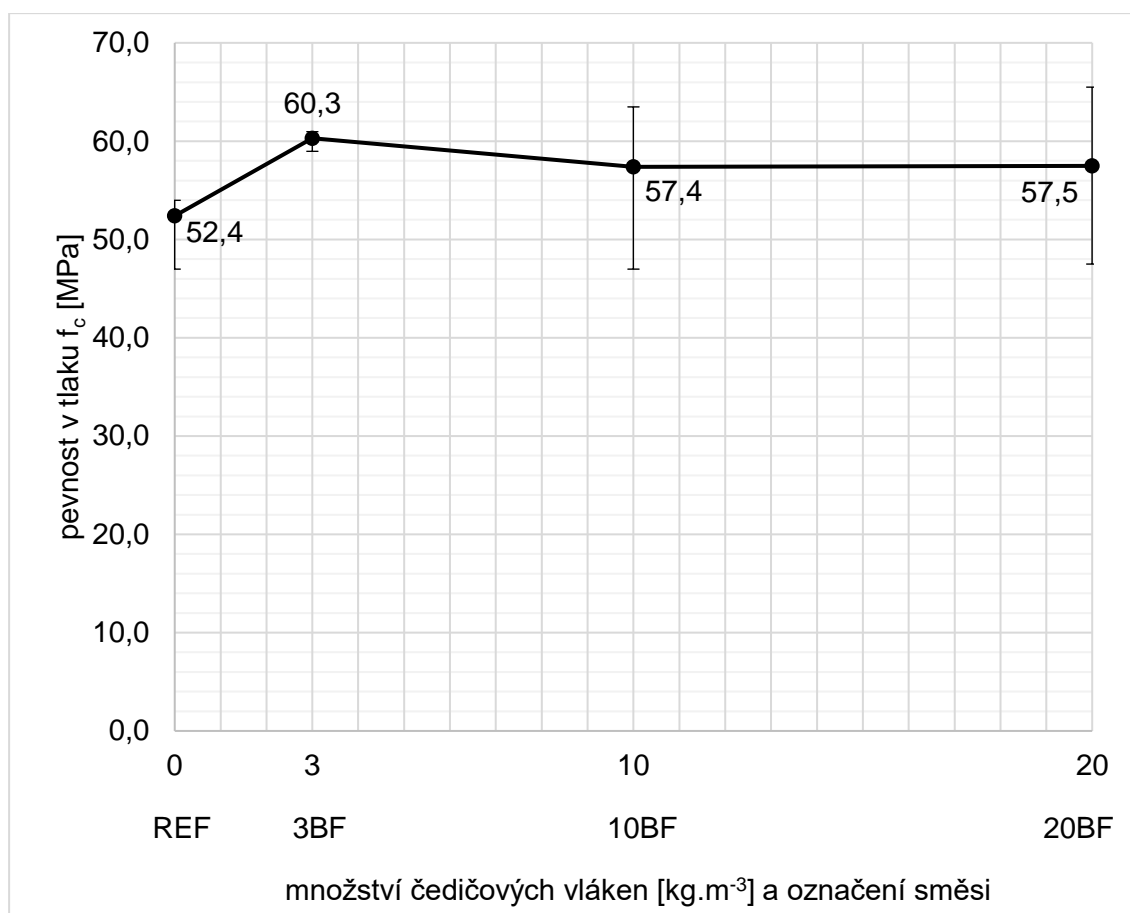
5.4.2.3 PEVNOST V TLAKU

Tabulka 30 – Pevnost v tlaku

označení		F _c [kN]		f _c [MPa]		Ø f _c [MPa]
REF	REF-1	565	470	56,5	47,0	52,4
	REF-2	605	540	60,5	54,0	
	REF-3	455	510	45,5	51,0	
3BF	3BF-1	580	610	58,0	61,0	60,3
	3BF-2	675	590	67,5	59,0	
	3BF-3	555	610	55,5	61,0	
10BF	10BF-1	650	575	65,0	57,5	57,4
	10BF-2	630	635	63,0	63,5	
	10BF-3	485	470	48,5	47,0	
20BF	20BF-1	605	610	60,5	61,0	57,5
	20BF-2	500	475	50,0	47,5	
	20BF-3	605	655	60,5	65,5	



Graf 15 – Porovnání pevností v tlaku u jednotlivých zkušebních těles

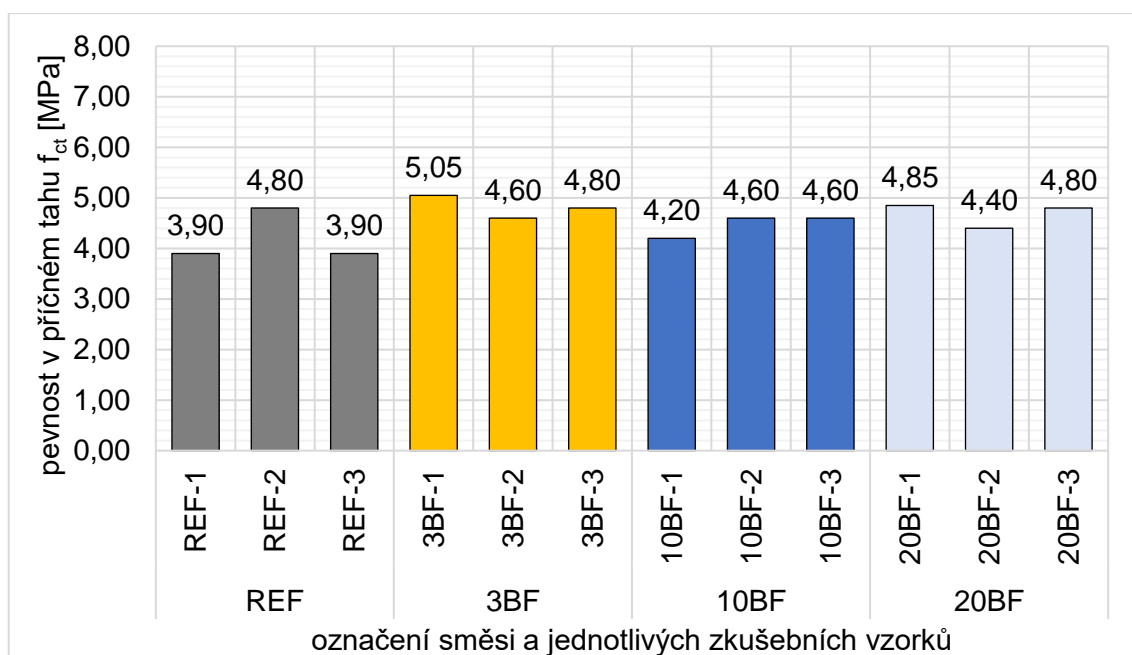


Graf 16 – Závislost průměrných hodnot pevností v tlaku na množství čedičových vláken

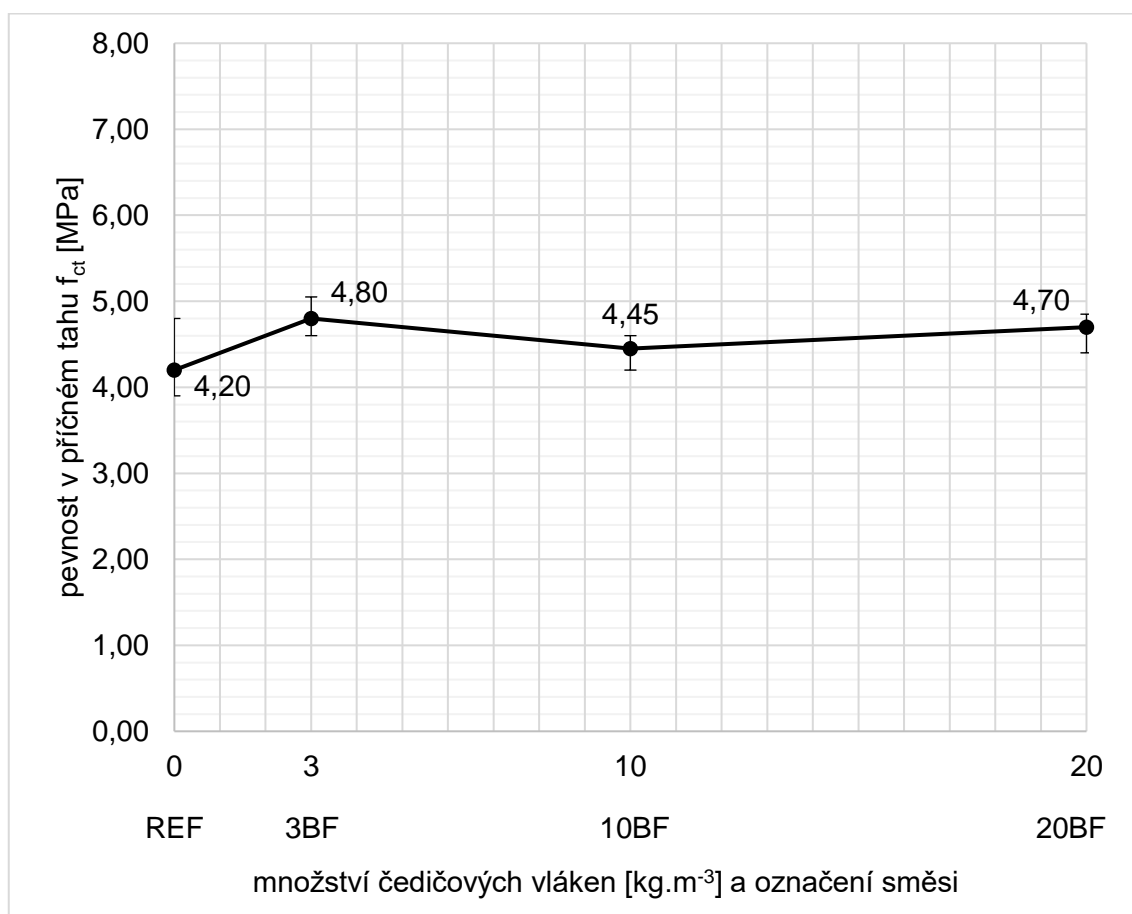
5.4.2.4 PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU

Tabulka 31 – Pevnost v příčném tahu

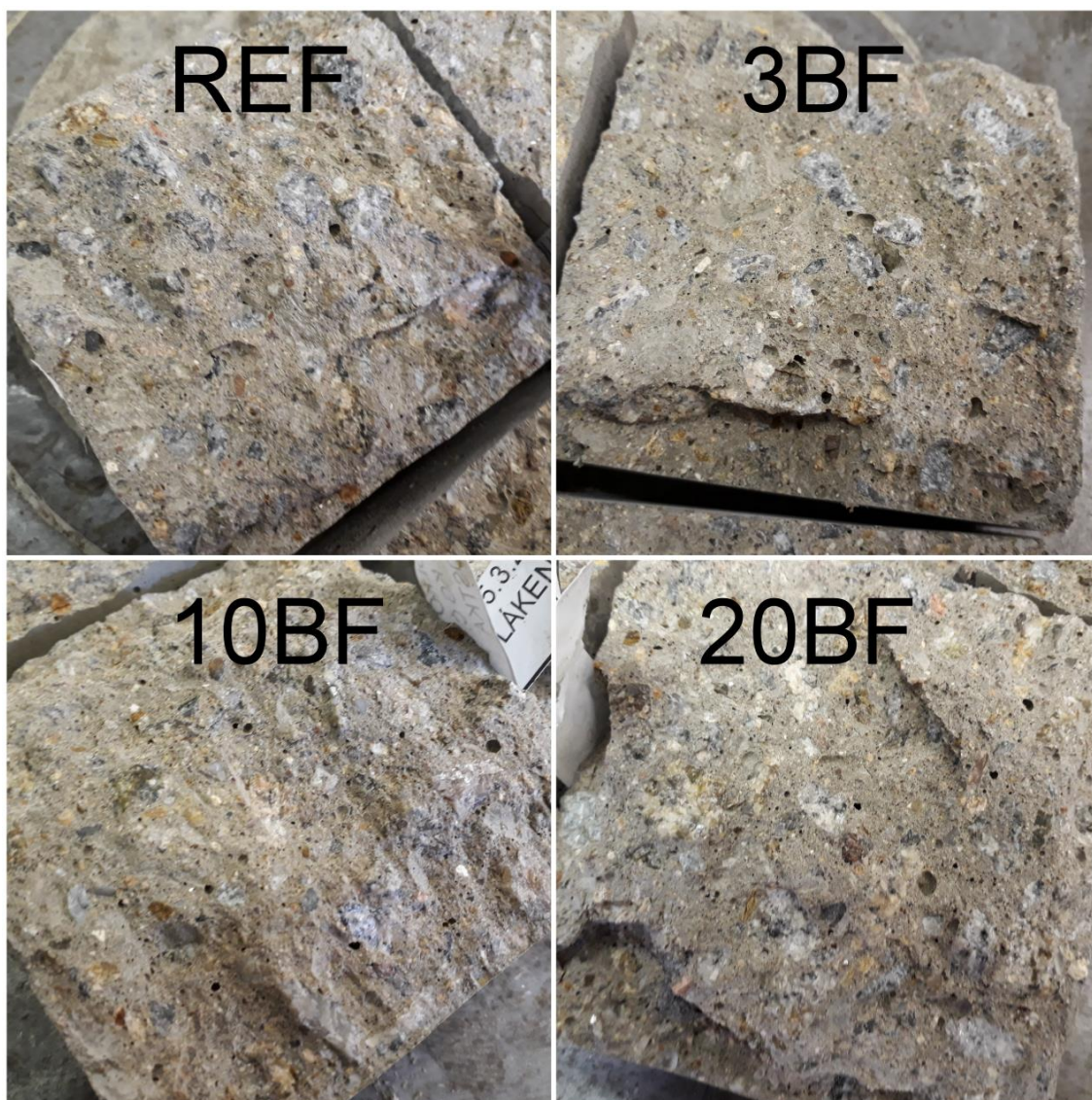
označení		F_{ct} [kN]	f_{ct} [MPa]	\bar{f}_{ct} [MPa]
REF	REF-4	61	3,9	4,20
	REF-5	75	4,8	
	REF-6	61	3,9	
3BF	3BF-4	79	5,05	4,80
	3BF-5	72	4,6	
	3BF-6	75	4,8	
10BF	10BF-4	62	4,2	4,45
	10BF-5	72	4,6	
	10BF-6	72	4,6	
20BF	20BF-4	76	4,85	4,70
	20BF-5	69	4,4	
	20BF-6	75	4,8	



Graf 17 – Závislost průměrných hodnot pevností v příčném tahu na množství čedičových vláken

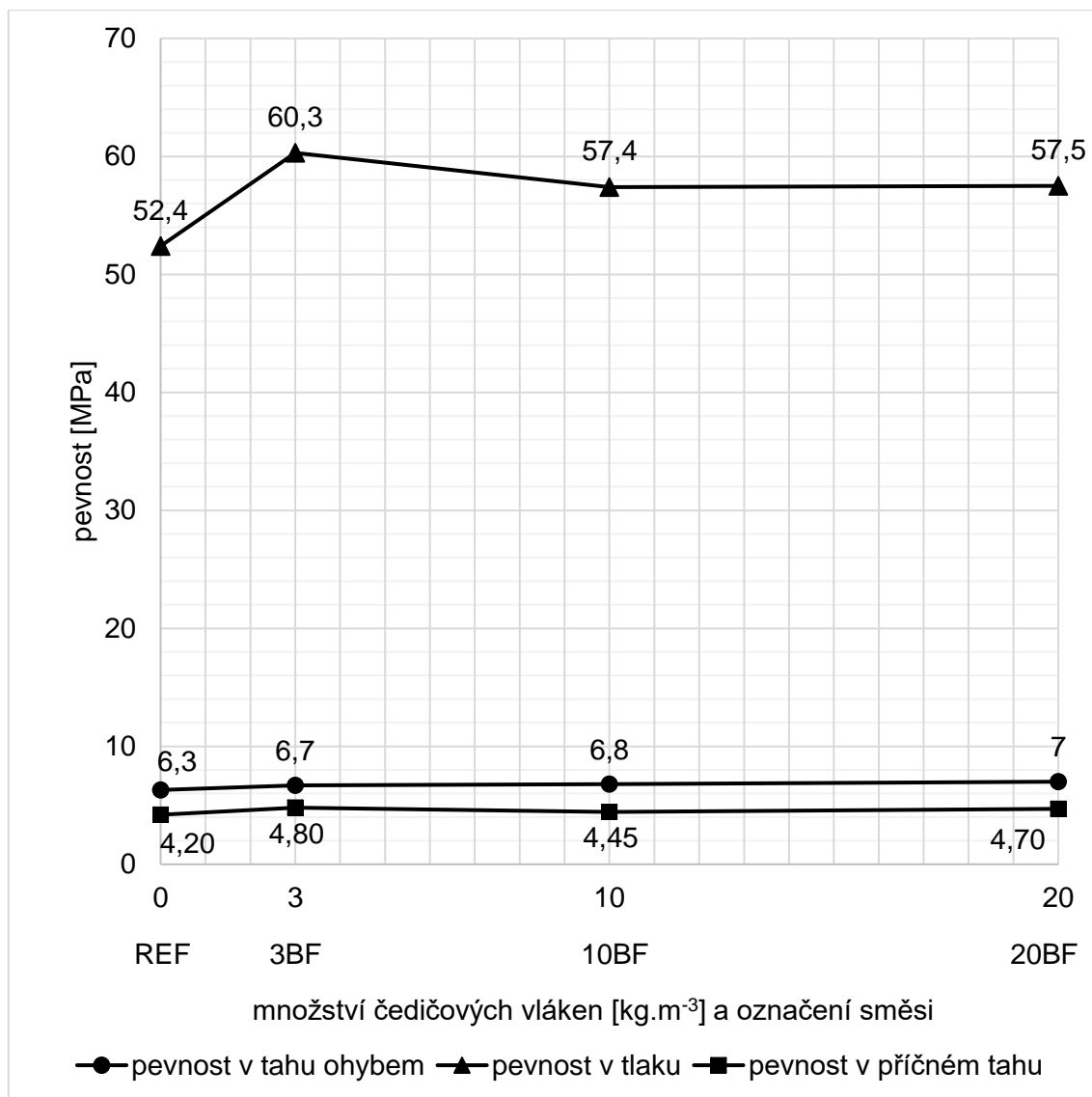


Graf 18 – Závislost průměrných hodnot pevností v příčném tahu na množství čedičových vláken



Obrázek 45 – Zkušební tělesa po zkoušce v příčném tahu

Použitá čedičová vlákna jsou velmi jemná, nelze je identifikovat volným okem, pro detekci je třeba použít zvětšení – proto byl použit elektronový rastrovací mikroskop. V průběhu míchání byla vlákna rovnoměrně rozptýlená v dávce 3 a 10 kg.m^{-3} (obrázek 38 a 39). V nejvyšší dávce 20 kg.m^{-3} byla homogenizace obtížná a byly patrné shluky vláken v čerstvém betonu (obrázek 40 a 41). Ve ztuhlém vzorku shluky vláken nebyly identifikovány, a to ani u jednoho vzorku po destruktivní zkoušce pevnosti.

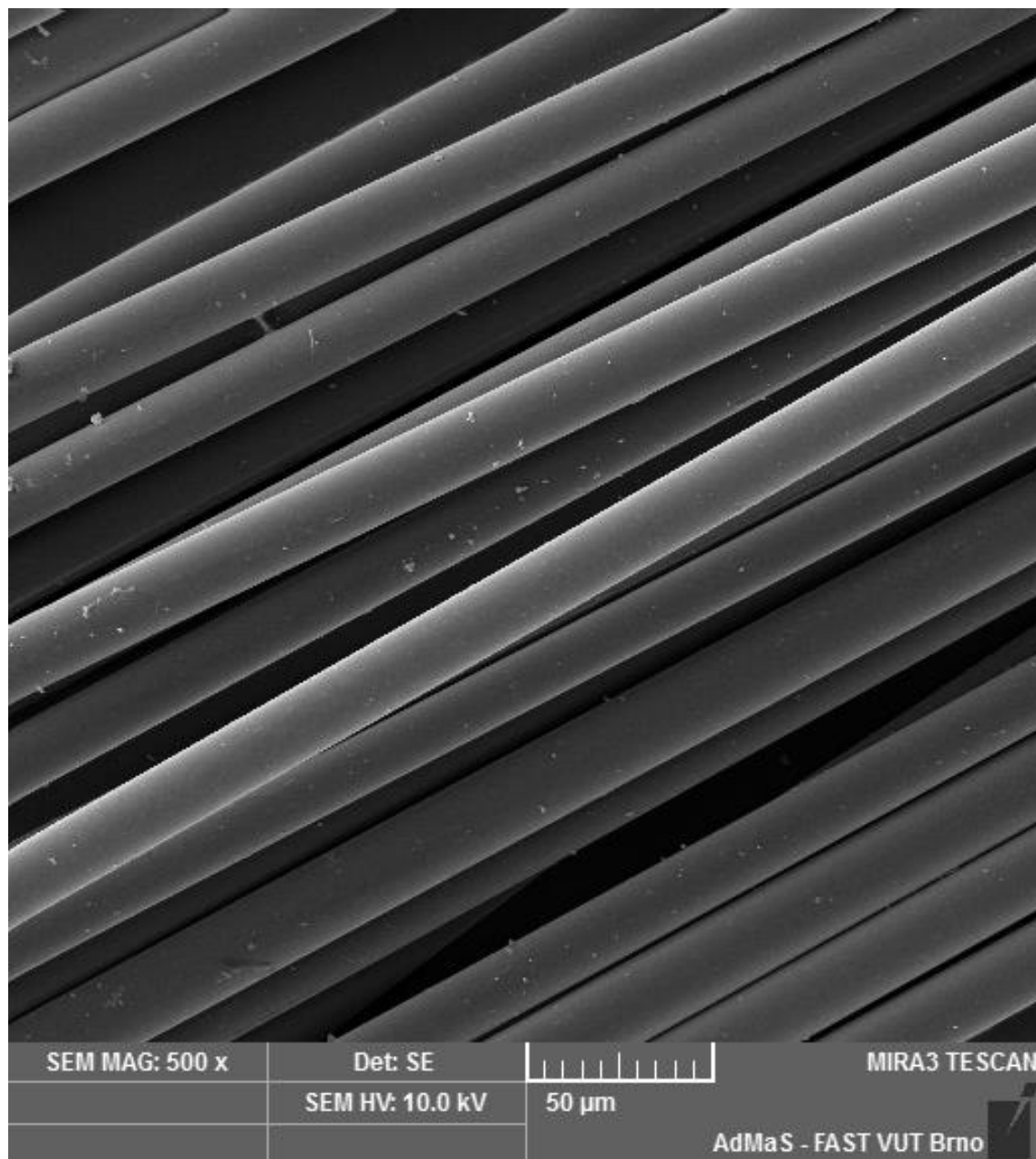


Graf 19 – Závislost pevnosti v tahu ohybem, pevnosti v tlaku a pevnosti v příčném tahu na množství čedičových vláken ve směsi

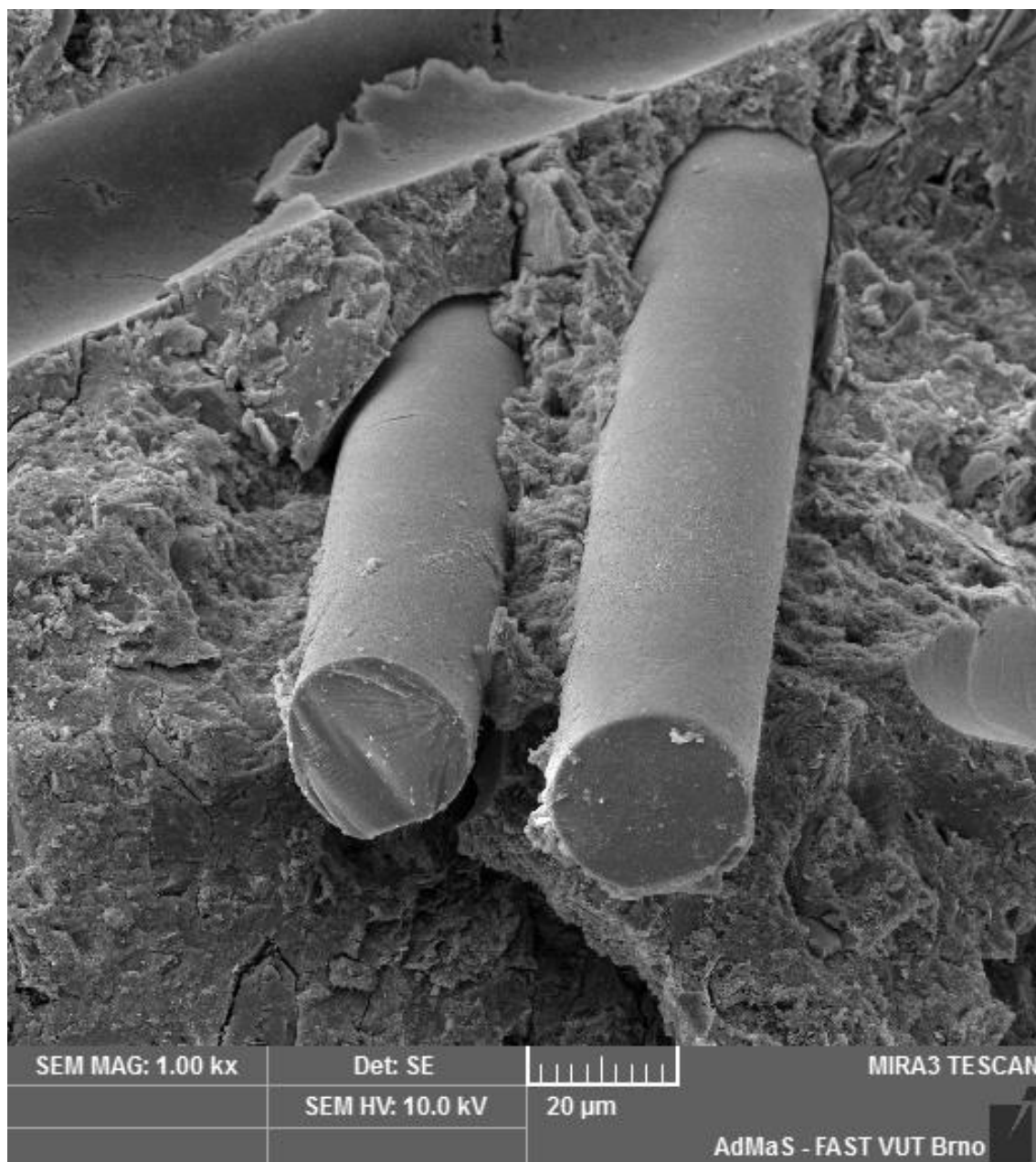
5.4.3 OVĚŘENÍ PŘÍTOMNOSTI ČEDIČOVÝCH VLÁKEN VE VZORKU

Na zkušební krychli ze záměsi 20BF o dávce 20 kg.m^{-3} čedičových vláken byla ověřena jejich přítomnost pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu Tescan Mira3 XMU.

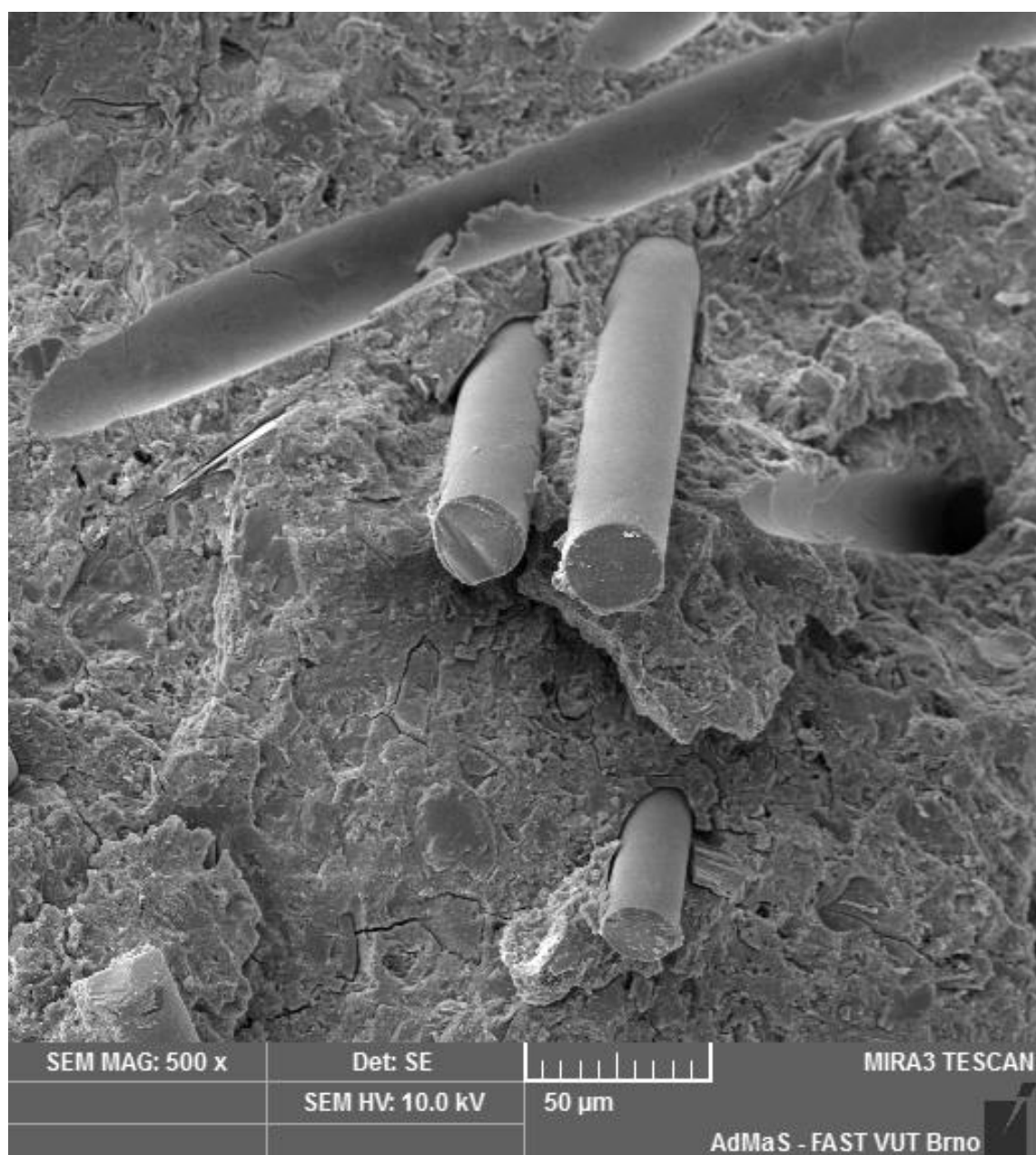
Vlákna jsou dokonale hladká a přímá, bez zakroucení v cementové matrici. Mají kruhový průřez o průměru $20 \text{ }\mu\text{m}$.



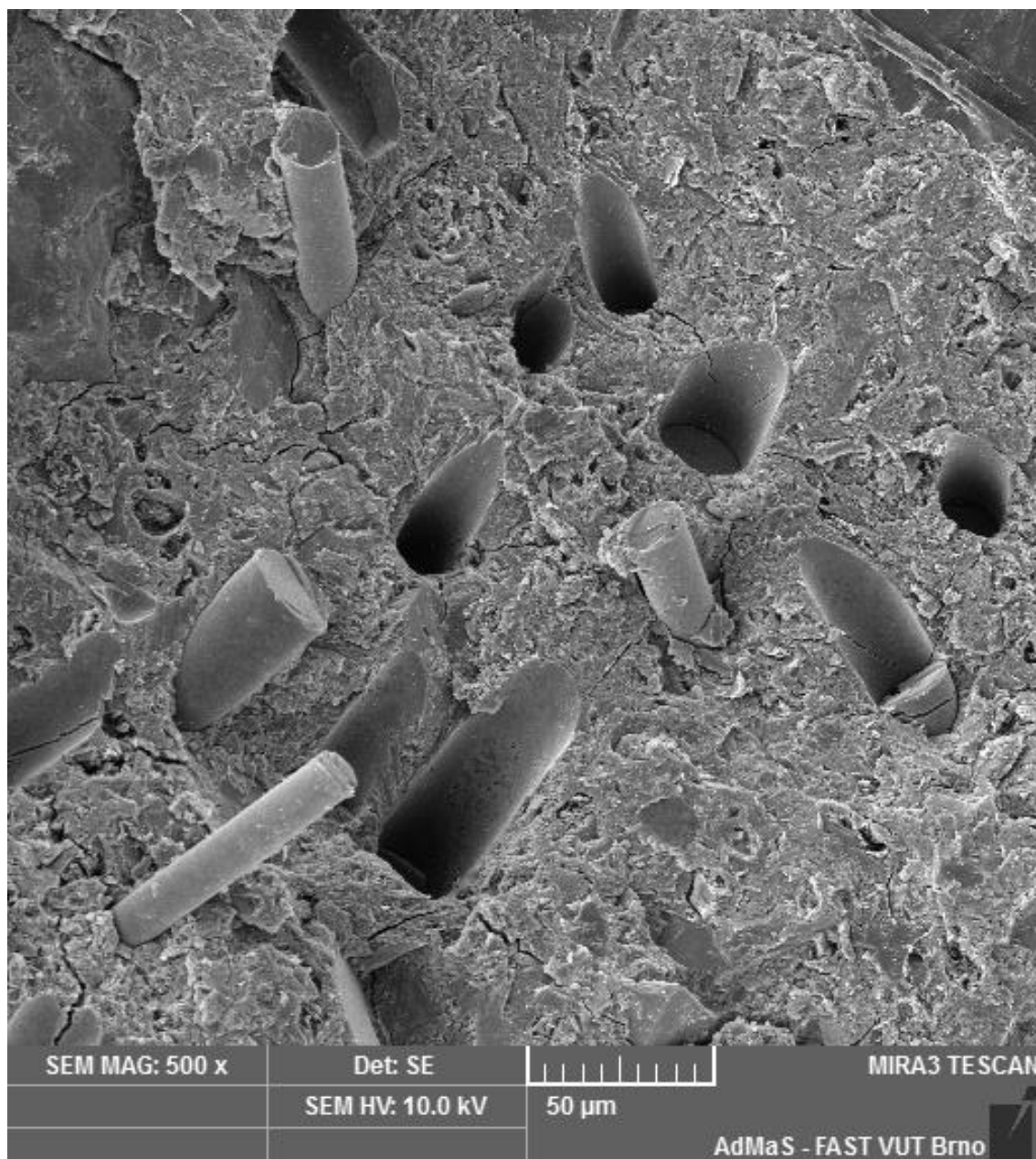
Obrázek 46 – Čedičová vlákna při zvětšení 500x



Obrázek 47 – Přítomnost čedičových vláken ve směsi 20BF – zvětšení 1000x



Obrázek 48 – Přítomnost čedičových vláken ve směsi 20BF – zvětšení 500x



Obrázek 49 – Přítomnost čedičových vláken ve směsi 20BF – zvětšení 500x



Obrázek 50 – Přítomnost čedičových vláken ve směsi 20BF – zvětšení 500x

5.5 SHRNUÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE

Byly namíchány 4 receptury o různém přídávku čedičových vláken – REF (bez přídávku), 3BF (dávka 3 kg.m^{-3} vláken), 10BF (dávka 10 kg.m^{-3} vláken) a 20BF (dávka 20 kg.m^{-3} vláken). Z každé směsi bylo vyrobeno 6 zkušebních těles – 3 trámce rozměrů (100 x 100 x 400) mm a 3 krychle o hraně 100 mm.

V průběhu míchání bylo pozorováno rozptýlení čedičových vláken ve směsi. U receptury 3BF a 10BF nebylo patrné shlukování vláken a po důsledném rozmíchání nebyly ve směsi díky své jemnosti viditelné. U receptury 20BF byly shluky vláken jasně identifikovatelné a rozmíchání velmi obtížné.

Konzistence byla ověřena sednutím kužele, přičemž u referenční směsi bylo sednutí 140 mm – třída S3. Se zvyšujícím se množstvím čedičových vláken ve směsi se zpracovatelnost zřetelně zhoršuje a sednutí klesá – 70 mm u směsi 3BF, 40 mm u směsi 10BF až po 0 mm u směsi 20BF s nejvyšším přídávkem vláken.

Objemová hmotnost v čerstvém stavu se u všech receptur pohybuje v podobných hodnotách v rozmezí $2350 - 2460 \text{ kg.m}^{-3}$, přičemž nejvyšší hodnota přináležejí receptuře referenční. Obsah vzduchu v čerstvém betonu se pohybuje v intervalu 2,2 – 2,5 % vzduchu. U dokonale zhutněného betonu uvažujeme 2 % obsahu vzduchu, můžeme tedy říct, že čedičová vlákna při zpracování nevnášejí vzduch do čerstvé směsi.

Objemová hmotnost v ztvrdlém stavu se u všech receptur pohybuje v podobných hodnotách v rozmezí $2320 - 2340 \text{ kg.m}^{-3}$. Dle odborného článku [26] byl předpoklad, že se zvyšujícím se přídávkem čedičových vláken se pevnost v tahu ohybem bude zvyšovat, což se i potvrdilo. Pevnost v tahu ohybem s vyšší dávkou vláken mírně stoupá – od 6,3 MPa u referenční směsi až po 7,0 MPa u směsi 20BF.

U pevnosti v tlaku a pevnosti v příčném tahu se neprojevil žádný výrazný rozdíl mezi referenční směsí a recepturami s přídávkem vláken. Pevnost v tlaku se pohybuje v rozmezí 52,4 – 60,3 MPa a pevnost v příčném tahu je v intervalu 4,20 – 4,80 MPa.

6 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala vlastnostmi čedičových vláken, technologii výroby a jejich použitím v cementových kompozitech – konkrétně v betonu. Cílem bylo namíchat cementový kompozit s obsahem čedičových vláken a ověřit jejich chování v čerstvé směsi i v ztvrdlém vzorku.

V experimentální části bakalářské práce byly zhotoveny betonové vzorky o různých dávkách čedičových vláken. V dávkách 3 a 10 kg.m⁻³ nebyl problém se shlukování vláken nebo jejich nedostatečnou homogenizací. U nejvyšší dávky 20 kg.m⁻³ bylo míchání a rovnoměrné rozptýlení vláken velmi obtížné. Dále bylo dokázáno, že se zvyšujícím se přídatkem vláken se zhoršuje zpracovatelnost čerstvé směsi. Co se týče obsahu vzduchu v čerstvém betonu, dá se předpokládat, že při zpracování, vlákna do směsi nevnáší nadměrné množství vzduchových pórů.

Hlavním důvodem pro přidání čedičových vláken v dosavadních studiích bylo ověření zlepšení ohybové pevnosti. U delších vláken se uplatňuje efekt přemostění trhlin, a proto by pevnost v tahu ohybem měla být se zvyšujícím se přídatkem vláken vyšší. Tento předpoklad se nám podařilo naplnit. Zlepšení ohybových pevností je spíše mírné, ale jasně můžeme vidět stoupající tendenci. U pevnosti v tlaku a pevnosti v příčném tahu nevidíme žádný klesající nebo stoupající trend. Nejpříznivější hodnoty pro pevnost v tlaku a pevnost v příčném tahu jsou patrné pro směs s přídatkem vláken v dávce 3 kg.m⁻³, což je velmi příbuzné k optimálnímu dávkování 2 kg.m⁻³, které udává výrobce použitých vláken.

Na rozdíl od zřetelných shluků vláken v čerstvé směsi s přídatkem vláken v dávce 20 kg.m⁻³, v žádném ze vzorků o stáří 28 dnů nebylo možné vlákna identifikovat z důvodu jejich jemnosti. Pouhým pozorováním bez zvětšení proto nebylo možné ověřit jejich přítomnost. Vlákna byla v betonu identifikována v betonu pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu.

Prokázalo se, že přídatek čedičových vláken zhoršuje zpracovatelnosti betonu, stejně jak ve studii [26] a při praktických realizacích popsanych v [36]. Změnu konzistence je třeba řešit zvýšením přídatku plastifikační přísady, aby nedošlo k dodatečnému dávkování vody a tím ke znehodnocení pozitivního efektu čedičových vláken – jako v případě [36] popsaném v teoretické části.

Stejně jako ve studii [26] se neprokázal výrazný vliv na pevnosti, ale zajímavá je oblast sledování trvanlivost čedičových vláken v agresivních prostředích, například ve vysoce alkalickém prostředí, kde mohou jemná skleněná vlákna rychle korodovat. Další výzkum je možné směřovat tímto směrem.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MILITKÝ, Jiří, Vladimír KOVAČIČ a Jitka RUBNEROVÁ. Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2002, **69**(9), 1025-1033 [cit. 2018-02-16]. DOI: 10.1016/S0013-7944(01)00119-9. ISSN 00137944. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013794401001199>
- [2] MILITKY, Jiri a Vladimir KOVACIC. Ultimate Mechanical Properties of Basalt Filaments. *Textile Research Journal* [online]. 2016, **66**(4), 225-229 [cit. 2018-02-16]. DOI: 10.1177/004051759606600407. ISSN 0040-5175. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/004051759606600407>
- [3] *Bazalt: Česká geologický encyklopedie* [online]. Brno: Česká geologická služba, 2007 [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?bazalt>
- [4] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN isbn80-8076-007-1.
- [5] RAMAKRISHNAN, TOLMARE a BRIK. *Performance Evaluation of 3-D Basalt Fiber Reinforced Concrete & Basalt Rod Reinforced Concrete. Final Report for Highway IDEA Project 45*. 79. Transportation Research Board, 1998.
- [6] MOROVA, Nihat. Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2013, **47**(4), 175-180 [cit. 2018-02-16]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.048. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813003899>
- [7] DEÁK, Tamás a Tibor CZIGÁNY. Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison. *Textile Research Journal* [online]. 2009, **79**(7), 645-651 [cit. 2018-02-16]. DOI: 10.1177/0040517508095597. ISSN 0040-5175. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0040517508095597>
- [8] NOVÁKOVÁ, Iveta a Lenka BODNÁROVÁ. High Strength Concrete with Enhanced Properties by Addition of Chopped Basalt Fibres. *Konference Maltoviny 2016*. 2016.
- [9] FIORE, V., T. SCALICI, G. DI BELLA a. VALENZA. A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2015, (74), 74-94 [cit. 2017-09-22]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.034. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836815000062>
- [10] YING, Shuni a Xiaodong ZHOU. Chemical and thermal resistance of basalt fiber in inclement environments. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed* [online]. 2013, **28**(3), 560-565 [cit. 2017-10-20]. DOI: 10.1007/s11595-013-0731-4. ISSN 1000-2413. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11595-013-0731-4>
- [11] HAO, L. C. a W. D. YU. Evaluation of thermal protective performance of basalt fiber nonwoven fabrics. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* [online]. 2010, **100**(2),

551-555 [cit. 2018-02-16]. DOI: 10.1007/s10973-009-0179-0. ISSN 1388-6150. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10973-009-0179-0>

[12] FÖRSTER, T, G SOMMER, E MÄDER a C SCHEFFLER. Surface, interphase and tensile properties of unsized, sized and heat treated basalt fibres. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2016, **139**, 012019- [cit. 2017-10-20]. DOI: 10.1088/1757-899X/139/1/012019. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/139/i=1/a=012019?key=crossref.0c6fce669e2ef27dae4d36ce26b76eae>

[13] RYBIN, V.A., A.V. UTKIN a N.I. BAKLANOVA. Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers. *Cement and Concrete Research* [online]. 2013, **53**, 1-8 [cit. 2018-02-16]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.06.002. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884613001373>

[14] LUND, Majbritt D. a Yuan-Zheng YUE. Influences of chemical aging on the surface morphology and crystallization behavior of basaltic glass fibers. *Journal of Non-Crystalline Solids* [online]. 2008, **354**(12-13), 1151-1154 [cit. 2018-02-16]. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2006.11.031. ISSN 00223093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022309307011702>

[15] Basalt Continuous Fiber. *Basalt continuous fibers materials production* [online]. Shanghai: Basalt Fiber & Composite Materials Technology Development, 2014 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://basaltm.com/en/bnv/basalt-continuous-fiber.html>

[16] LOPRESTO, V., C. LEONE a I. DE IORIO. Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2011, **42**(4), 717-723 [cit. 2018-02-16]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.01.030. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836811000588>

[17] KOGAN, FM. a OV. NIKITINA. *Solubility of chrysotile asbestos and basalt fibres in relation to their fibrogenic and carcinogenic action, workshop on biopersistence of respirable synthetic fibres and minerals held*. Lyon, 1992.

[18] QUAGLIARINI, Enrico, Francesco MONNI, Stefano LENCI a Federica BONDIOLI. Tensile characterization of basalt fiber rods and ropes: A first contribution. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, **34**(1), 372-380 [cit. 2018-02-16]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.080. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812001572>

[19] OSNOS, Sergey. Basalt continuous fiber: development of technologies and equipment from the past to the present. *BASALT FIBER & COMPOSITE MATERIALS TECHNOLOGY DEVELOPMENT* [online]. 2006 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <http://basaltfm.com/eng/articles/article01.html>

[20] *Technology of production of basalt continuous fiber* [online]. Aleksandr Novytsky, 2000 [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: <http://novitsky1.narod.ru/basalt91.html>

- [21] BORHAN, Tumadhir Merawi. Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre. *Materials & Design* [online]. 2012, **42**, 265-271 [cit. 2018-03-07]. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.05.062. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026130691200372X>
- [22] JIANG, Chao Hua, T.J. MCCARTHY, D. CHEN a Q.Q. DONG. Influence of Basalt Fiber on Performance of Cement Mortar. *Key Engineering Materials* [online]. 2010, **426-427**, 93-96 [cit. 2018-03-07]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.426-427.93. ISSN 1662-9795. Dostupné z: <http://www.scientific.net/KEM.426-427.93>
- [23] DIAS, Dylmar Penteado a Clelio THAUMATURGO. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2005, **27**(1), 49-54 [cit. 2018-03-07]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044. ISSN 09589465. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946504000575>
- [24] ZIELINSKI, Krzysztof a P. OLSZEWSKI. The impact of basaltic fibre on selected physical and mechanical properties of cement mortar. *Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Precasting Plant and Technology* [online]. 2005, **3**(71), 28-33 [cit. 2018-03-07]. ISSN 03734331. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/285795477_The_impact_of_basaltic_fibre_on_selected_physical_and_mechanical_properties_of_cement_mortar
- [25] ZHAO, Q., J. DONG, H. PAN a S. Impact behavior of basalt fiber reinforced concrete. *Fuhe Cailiao Xuebao/Acta Materiae Compositae Sinica* [online]. 2010, **27**(6), 120-125 [cit. 2018-03-07]. ISSN 10003851. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-78651346736&origin=inward&txGid=c7a37d137cb5bc64b0dd8cf697476c4c>
- [26] JIANG, Chaohua, Ke FAN, Fei WU a Da CHEN. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials & Design* [online]. 2014, **58**, 187-193 [cit. 2018-03-07]. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.01.056. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306914000855>
- [27] BURDOVÁ, Anna. *Basalty a jejich využití pro tavené výrobky*. Praha, 2007. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Fakulta přírodovědecká, Ústav geochemie, mineralogie a nrostrných zdrojů. Vedoucí práce doc. Mgr. Richard Přikryl, Dr.
- [28] Kamenny Vek. *Basalt fiber* [online]. Moscow, 2017 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://basfiber.com/eng>
- [29] BODNÁROVÁ, Lenka. *Kompozitní materiály*. Brno: VUT Brno, 2007. Studijní opory.
- [30] Orlimex CZ s.r.o. *Orlimex CZ s.r.o.* [online]. Osík u Litomyšle [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.orlimex.cz/>
- [31] Basalt Fiber. *Basalt Fiber* [online]. Zhejiang, 2011 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.basaltfiber-gbf.com/basalt-twill-fabric-supplier.html>

- [32] CEM I 42,5 R. *Heidelberg Cement v České republice* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs>
- [33] CHRYSO Fluid Optima 224. *Chryso* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.chryso.cz/p/7450/chryso-fluid-optima-224>
- [34] Keston Bazalt. *Techno-Wato Kereskedőház Kft.* [online]. Budapest, 2012 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.technowato.hu/>
- [35] Charakteristika čedičových vláken. *Basaltex a.s.* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: http://www.basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm
- [36] BRANSTON, John-Sebastian. *Properties and applications of basalt fibre reinforced concrete* [online]. Windsor, Ontario, Canada, 2015 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.cz/&httpsredir=1&article=6627&context=etd>. University of Windsor.
- [37] Kompozitní profily PREFEN – PREFA KOMPOZITY, a.s. *PREFA KOMPOZITY, a.s.* [online]. 2015, 2015 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/produkty/kompozitni-profil-y-prefen/>
- [38] *Luleå tekniska universitet* [online]. Copenhagen, 2013 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: https://www.ltu.se/cms_fs/1.111059!/file/Eythor_Thorhallsson.pdf
- [39] CHROMKOVÁ, Ivana a Pavel LEBER. *Vliv přídavku odpadního čedičového a odpadního skelného vlákna na vlastnosti betonu* [online]. In: . 2015 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2015/prispevky/007.pdf>
- [40] *Galen* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://galencomposite.com/>
- [41] *Basalt rebat, basalt fiber, basalt roving – Technobasalt* [online]. Ukraine [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://technobasalt.com/>
- [42] ZACH, Jiří. *Speciální izolace*. Brno: VUT Brno, 2007. Studijní opory.
- [43] *ISOVER: sustainable insulation solutions* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.isover.com/>
- [44] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [45] ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7 Obsah vzduchu – Tlakové metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [46] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [47] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [48] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Čedičová vlákna [28]	20
Obrázek 2 – Zjednodušené schéma výrobní linky čedičových vláken [7]	27
Obrázek 3 – Trhliny v opěrné zdi [36]	34
Obrázek 4 – Hlavní trhlina na opěrné zdi z obou stran [36]	34
Obrázek 5 – Hlavní průběžná trhlina s obnaženou výztuží z obou stran mostovky [36]	35
Obrázek 6 – Obnažená výztuž na spodní části mostovky [36]	35
Obrázek 7 – Vrchní část konstrukce mostu [36]	36
Obrázek 8 – Míchání betonové směsi a následné nanášení stříkáním [36]	37
Obrázek 9 – Přidávání čedičových vláken do autodomíchavače, čedičové tyče pro zabezpečení spolupůsobení konstrukcí [36]	37
Obrázek 10 – Umísťování čedičových výztužných sítí [36]	38
Obrázek 11 – Zrekonstruovaná zeď po jednom roce [36]	38
Obrázek 12 – Zrekonstruovaná zeď po jednom roce [36]	39
Obrázek 13 – Zrekonstruovaná spodní část mostovky po jednom roce [36]	39
Obrázek 14 – Zrekonstruovaná spodní část mostovky po jednom roce [36]	39
Obrázek 15 – Zrekonstruovaná vrchní část mostové konstrukce po jednom roce [36]	40
Obrázek 16 – Rez na povrchu betonu před rekonstrukcí (vlevo) a po rekonstrukci (vpravo) [36]	41
Obrázek 17 – Čedičové výztužné tyče [30]	43
Obrázek 18 – Vyztužení mezipatrové desky pomocí čedičových výztužných tyčí bez změny průměru [30]	43
Obrázek 19 – Základová deska trojpatrového cihlového bytového domu [30]	44
Obrázek 20 – Základová deska trojpatrového cihlového bytového domu [30]	44
Obrázek 21 – Aplikace čedičových kompozitních sítí v průmyslové podlaze [30]	46
Obrázek 22 – Aplikace čedičových kompozitních sítí v průmyslové podlaze [30]	46
Obrázek 23 – Aplikace čedičových kompozitních sítí v stěnové monolitické konstrukci [30]	47
Obrázek 24 – Detail aplikace čedičové kompozitní sítě v stěnové monolitické konstrukci [30]	47
Obrázek 25 – Renovace betonového sloupu omotáním čedičovými výztužnými sítěmi [38]	48
Obrázek 26 – Renovace pilíře omotáním čedičovými výztužnými sítěmi [38]	48

Obrázek 27 – Renovace betonového sloupu omotáním čedičovými výztužnými sítěmi [38]	49
Obrázek 28 – Čedičová tkanina [31]	49
Obrázek 29 – Příčný roving [28]	50
Obrázek 30 – Pravidelně uspořádaný roving [28]	51
Obrázek 31 – Vysokovýkonný roving [28]	51
Obrázek 32 – Kroucená čedičová příze [28]	52
Obrázek 33 – Minerální čedičová vlna od výrobce ISOVER [43]	53
Obrázek 34 – Blokové schéma výroby minerální vlny [42]	54
Obrázek 35 – Znečištěné zbytky odpadní čedičové (vlevo) a skelné (vpravo) vlny [39]	55
Obrázek 36 – Upravená a přečištěná čedičová (vlevo) a skleněná (vpravo) vlna [39]	55
Obrázek 37 – Použitá čedičová vlákna od výrobce TECHNOBASALT	71
Obrázek 38 – Směs 3BF	73
Obrázek 39 – Směs 10BF	73
Obrázek 40 – Směs 20BF	74
Obrázek 41 – Směs 20BF	74
Obrázek 42 – Zkušební tělesa – krychle	75
Obrázek 43 – Zkušební tělesa – trámce	75
Obrázek 44 – Zkušební tělesa po zkoušce v tahu ohybem	82
Obrázek 45 – Zkušební tělesa po zkoušce v příčném tahu	86
Obrázek 46 – Čedičová vlákna při zvětšení 500x	88
Obrázek 47 – Přítomnost čedičových vláken ve směsi 20BF – zvětšení 1000x	89
Obrázek 48 – Přítomnost čedičových vláken ve směsi 20BF – zvětšení 500x	90
Obrázek 49 – Přítomnost čedičových vláken ve směsi 20BF – zvětšení 500x	91
Obrázek 50 – Přítomnost čedičových vláken ve směsi 20BF – zvětšení 500x	92

9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Vlastnosti taveného čediče [4]	19
Tabulka 2 – Chemické složení čedičových vláken podle dvou různých zdrojů [1,7] ..	20
Tabulka 3 – Porovnání vybraných fyzikálně-mechanických vlastností čedičových a skleněných vláken [9]	23
Tabulka 4 – Porovnání vybraných vlastností čedičových, skleněných a uhlíkových vláken [15].....	23
Tabulka 5 – Charakteristika čedičových vláken od společnosti Orlimex CZ, s.r.o. [30]	23
Tabulka 6 – Značení čedičových a skleněných vláken použitých při zjišťování modulu pružnosti v tahu a jejich výrobci [7]	24
Tabulka 7 – Chemické složení čedičových a skleněných vláken použitých u zjišťování modulu pružnosti v tahu [7]	24
Tabulka 8 – Naměřené hodnoty u vláken uvedených v tabulce 6 [7]	25
Tabulka 9 – Složení betonové směsi [26]	29
Tabulka 10 – Druhy použitých vláken a jejich vybrané vlastnosti [26]	29
Tabulka 11 – Pevnost v tlaku a efektivita pevnosti všech receptur (efektivita = podíl rozdílu pevnosti v tlaku vláknobetonu a prostého betonu k pevnosti v tlaku prostého betonu) [26]	31
Tabulka 12 – Pevnost v tahu ohybem a efektivita pevnosti všech receptur (efektivita = podíl rozdílu pevnosti v tahu ohybem vláknobetonu a prostého betonu k pevnosti v tahu ohybem prostého betonu) [26].....	33
Tabulka 13 – Porovnání vlastností různých typů výztužných tyčí [30, 37]	42
Tabulka 14 – Porovnání vlastností kompozitní a ocelové sítě [30]	45
Tabulka 15 – Vstupní analýza odpadních zbytků čedičové a skelné vlny [39].....	55
Tabulka 16 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti betonů s čedičovými vlákny po 28 dnech zrání [39]	56
Tabulka 17 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti betonů se skelnými vlákny po 28 dnech zrání [39]	56
Tabulka 18 – Třídy konzistence u zkoušky sednutím [44]	64
Tabulka 19 – Chemické vlastnosti [32]	69
Tabulka 20 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti [32]	69
Tabulka 21 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti použitých čedičových vláken [34]....	71
Tabulka 22 – Složení všech receptur.....	72
Tabulka 23 – Konzistence čerstvého betonu – zkouška sednutím	76

Tabulka 24 – Objemová hmotnost čerstvého betonu	77
Tabulka 25 – Obsah vzduchu v čerstvém betonu	77
Tabulka 26 – Hmotnost a rozměry zkušebních trámců	78
Tabulka 27 – Hmotnost a rozměry zkušebních krychlí	79
Tabulka 28 – Objemová hmotnost betonu ve ztvrdlém stavu	79
Tabulka 29 – Pevnost v tahu ohybem	81
Tabulka 30 – Pevnost v tlaku	83
Tabulka 31 – Pevnost v příčném tahu	84

10 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – TGA křivka pro skleněná a čedičová vlákna [11]	21
Graf 2 – Změna pevnosti v tahu čedičových a skleněných vláken v závislosti na čase při uložení v roztoku NaOH o koncentraci $c = 0,2 \text{ mol.l}^{-1}$ při teplotě $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]	22
Graf 3 – Porovnání modulů pružnosti v tahu, v tahu ohybem a v tlaku u čedičových a skleněných vláken [16]	24
Graf 4 – Pracovní diagram krátkých čedičových vláken, nekonečných čedičových vláken od tří výrobců a skleněných vláken [7]	25
Graf 5 – Závislost procentuálního objemu vláken na efektivitě pevnosti v tahu (efektivita = podíl rozdílu pevnosti v tahu vláknobetonu a prostého betonu k pevnosti v tahu prostého betonu) [26]	32
Graf 6 – Závislost pevnosti v tahu ohybem po 7 a 28 dnech na obsahu čedičového/skelného vlákna [39]	56
Graf 7 – Závislost pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech a objemové hmotnosti na obsahu čedičového/skelného vlákna [39]	57
Graf 8 – Vyhodnocení zkoušek mrazuvzdornosti po 0, 25 a 50 cyklech u směsí s různým obsahem čedičového/skelného vlákna [39]	57
Graf 9 – Závislost konzistence (sednutí kužele) čerstvé směsi na množství čedičových vláken	76
Graf 10 – Závislost objemová hmotnosti čerstvé směsi a obsahu vzduchu na množství čedičových vláken	78
Graf 11 – Závislost objemové hmotnosti ztvrdlého betonu na množství čedičových vláken	80
Graf 12 – Porovnání objemových hmotností čerstvého a ztvrdlého betonu po 28 dnech	80
Graf 13 – Porovnání pevností v tahu ohybem u jednotlivých zkušebních těles	81
Graf 14 – Závislost průměrných hodnot pevností v tahu ohybem na množství čedičových vláken	82
Graf 15 – Porovnání pevností v tlaku u jednotlivých zkušebních těles	83
Graf 16 – Závislost průměrných hodnot pevností v tlaku na množství čedičových vláken	84
Graf 17 – Závislost průměrných hodnot pevností v příčném tahu na množství čedičových vláken	85
Graf 18 – Závislost průměrných hodnot pevností v příčném tahu na množství čedičových vláken	85

Graf 19 – Závislost pevnosti v tahu ohybem, pevnosti v tlaku a pevnosti v příčném tahu na množství čedičových vláken ve směsi	87
--	----

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Technický list – portlandský cement CEM I 42,5 R

Příloha 2 – Technický list – superplastifikační přísada CHRYSO® Fluid Optima 224

Příloha 3 – Technický list – čedičová vlákna KESTON BAZALT

CEM I 42,5 R

Portlandský cement

EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

Technický list
září 2017**Charakteristické vlastnosti:**

- rychlý nárůst pevnosti
- vysoká počáteční pevnost
- vysoká konečná pevnost
- rychlý vývin hydratačního tepla
- vyšší celkové hydratační teplo

Kvalita, bezpečnost, ekologie:

Kvalita výrobků, respekt k životnímu prostředí, důraz na bezpečnost zaměstnanců a hospodárné využívání energetických zdrojů patří k našim hlavním prioritám. Plnění požadavků příslušných systémů managementu je potvrzeno vydanými certifikáty:

- Management kvality ČSN EN ISO 9001
- Management bezpečnosti a ochrany zdraví při práci ČSN OHSAS 18001
- Environmentální management ČSN EN ISO 14001
- Management hospodaření s energií ČSN EN ISO 50001

Použití:

- betony běžných a vyšších pevnostních tříd
- betony s rychlým nárůstem pevnosti
- předpínané betony
- suché omítkové směsi a malty
- betonové zboží

**Způsob dodání:**

- volně ložený v autocisternách nebo železničních vagonech Raj
- balený v papírových pytlích 25 kg s polyetylenovou vložkou, na vratných paletách o celkové hmotnosti 1,4 t

Obsah složek		
Hlavní složka	Portlandský slínek	95–100 %
Doplňující složka		0–5 %

Druh, množství a kvalita hlavních i doplňujících složek se odvíjí od požadavků technické normy EN 197-1. Mezi složky nepatří siran vápenatý, který se přidává jako regulátor tuhnutí, ani případné přísady usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu.

Českomoravský cement, a.s.
Technická podpora prodeje
technicka.podpora@cmcem.cz
+420 544 122 544

www.cmcem.cz

**ČESKOMORAVSKÝ
CEMENT**
HEIDELBERGCEMENT Group

CEM I 42,5 R

Portlandský cement

EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

Technický list

září 2017

Fyzikální a mechanické vlastnosti				Chemické vlastnosti			
Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka	Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	14	EN 196-1	Obsah [%]	CaO	64,2	EN 196-2
	2 dny	29	EN 196-1		SiO ₂	19,5	EN 196-2
	7 dní	53	EN 196-1		Al ₂ O ₃	4,7	EN 196-2
	28 dní	61	EN 196-1		Fe ₂ O ₃	3,2	EN 196-2
	56 dní	66	EN 196-1		MgO	1,3	EN 196-2
	90 dní	67	EN 196-1		SO ₃	3,2	EN 196-2
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4	EN 196-1		Cl ⁻	0,047	EN 196-2
	2 dny	6	EN 196-1		K ₂ O	0,78	EN 196-2
	7 dní	8	EN 196-1		Na ₂ O	0,09	EN 196-2
	28 dní	9	EN 196-1		Na ₂ O ekvivalent [%]	0,6	EN 196-2
	56 dní	9	EN 196-1		Nerozpustný zbytek [%]	0,8	EN 196-2
	90 dní	9	EN 196-1		Ztráta žiháním [%]	3,2	EN 196-2
Normální konzistence [%]		27,8	EN 196-3	V případě, že cement obsahuje (ve smyslu Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 1907/2006 přílohy XVII, čl. 47) redukční činidlo, které po smíchání s vodou snižuje obsah Cr ⁶⁺ v cementu pod hodnotu 0,0002 %, je toto činidlo účinné nejméně po dobu skladování cementu, po kterou musí být cement chráněn před působením vody a vysoké relativní vlhkosti vzduchu (nejvýše 75 %). Doba skladování cementu je 90 dnů od data uvedeného na obalu (balený cement) nebo od data expedice (volně ložený cement).			
Počátek tuhnutí [min]		219	EN 196-3				
Konec tuhnutí [min]		286	EN 196-3				
Objemová stálost [mm]		0,8	EN 196-3, Le Chatelier				
Měrný povrch [m ² ·kg ⁻¹]		374	EN 196-6, Blaine				
Měrná hmotnost [kg·m ⁻³]		3110	EN 196-6				
Sypná hmotnost [kg·m ⁻³] - v autocisterně		980	Přibližná hodnota při uložení cementu do cisterny.				
Sypná hmotnost [kg·m ⁻³] - v síle		1200–1600	Odhad při uskladnění v síle. Mění se v závislosti na míře setřesení cementu, době uskladnění nebo velikosti a zaplnění síla.				
Hydratační teplo [J·g ⁻¹]	7 dní	310	EN 196-8				

Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404																	
Bez rizika	Koroze způsobená karbonatácí				Působení chloridů (ne z mořské vody)			Střídavé působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí			Obrus		
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ ^{a)}	✓ ^{a)}	✓	✓	✓

a) Při chemické síranové agresivitě se stupněm vlivu prostředí vyšším než XA1 - koncentrace síranových iontů SO₄²⁻ vyšší než 600 mg/litr v podzemní vodě nebo 3000 mg/kg (v případě kapilárního sání 2000 mg/kg) v rostlé zemině - se musí použít síranovzdorný cement SR. Při obsahu SO₄²⁻ - do 1500 mg/litr je možné použít CEM I s dostatečnou dávkou pucolánové příměsi (například alespoň 20 % popílku).

Hodnoty uvedené v technickém listu mají čistě informativní charakter a mohou se lišit od hodnot konkrétních vzorků. Před jejich porovnáním s vlastnostmi jiných výrobků se prosím ujistěte, že všechna porovnávaná data byla získána pomocí totožných zkušebních postupů. V případě pochybností nás neváhejte kontaktovat.

Českomoravský cement, a.s.
Technická podpora prodeje
technicka.podpora@cmcem.cz
+420 544 122 544

www.cmcem.cz

ČESKOMORAVSKÝ CEMENT
HEIDELBERGCEMENT Group

Novinka

CHRYSO

CE

CHRYSO®Fluid Optima 224**Silně vodoredukující/superplastifikační přísada****POPIS**

CHRYSO®Fluid Optima 224 je superplastifikátor nové generace na bázi modifikovaných polykarboxylátů.

CHRYSO®Fluid Optima 224 je určen zejména pro transportbeton a inženýrské stavby.

CHRYSO®Fluid Optima 224 vykazuje silnou schopnost redukovat množství vody a prodloužit dobu zpracovatelnosti betonu. Umožní výrobu betonů udržujících žádanou konzistenci po dlouhou dobu bez zpoždovacího efektu.

CHRYSO®Fluid Optima 224 lze použít pro široké spektrum typů betonů.

CHRYSO®Fluid Optima 224 je velmi vhodný pro přípravu homogenních samozhutitelných betonů.

CHRYSO®Fluid Optima 224 je kompatibilní s většinou cementů.

Vlastnosti

- Hnědá kapalina
- Hustota při 20°C: 1,05 kg/dm³ ± 0,02
- Obsah chloridů: ≤ 0,1%
- pH: 4,7 ± 1,0
- Obsah alkálií (ekv. Na₂O): ≤ 1,0%
- Obsah sušiny: 21,4 % ± 1,1 % (EN 480-8)

Balení

Soudek 60 l
barel 200 (215) l
kontejner 1.000 l (vratný)

CHRYSO®Fluid Optima 224 vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 934-1, ČSN EN 934-2, T 3.1/3.2
Výroba podléhá certifikovanému řízení výroby podle EN 934-6

POUŽITÍ

- transportbeton
- betony pro inženýrské stavby
- vysokopevnostní a vysokojakostní betony
- betony velmi měkké a tekuté
- samozhutitelné betony

Praktická doporučení

Dávkování: od 0,3 kg do 2,0 kg na 100 kg cementu.

CHRYSO®Fluid Optima 224 se musí přidávat se záměsovou vodou.

V případě přímého dávkování do automichače míchat při vysoké rychlosti po dobu minimálně 1 minuty na m³ směsi, nejméně však 6 minut.

Optimální dávku přísady je nutno stanovit na základě zkoušek v závislosti na charakteru vstupních surovin,

způsobu zpracování a požadavků na čerstvý a ztvrdlý beton.

CHRYSO®Fluid Optima 224 lze podle potřeby kombinovat v betonu spolu s dalšími vhodnými přísadami **CHRYSO®**.

Upozornění

- chraňte před mrazem a znečištěním
- v případě zmraznutí kontaktujte pracovníky **CHRYSO**
- nevystavujte přípravek dlouhodobě vyšším teplotám
- minimální doba použitelnosti **CHRYSO®Fluid Optima 224** je 9 měsíců

Novinka

CHRYSO



CE

CHRYSO® Fluid Optima 224

Silně vodoredukující/superplastifikační přísada

BEZPEČNOST PRÁCE

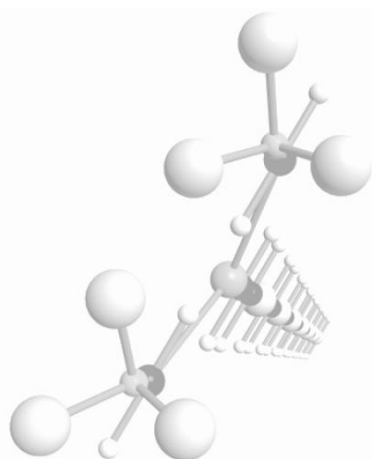
CHRYSO® Fluid Optima 224 není podle zákona č. 356/2003 Sb. v platném znění a souvisejících zákonných nařízeních klasifikován jako nebezpečný.

Doprava CHRYSO® Fluid Optima 224 nepodléhá dohodě ADR.

Používání zvláštních ochranných pomůcek:

- pro ochranu dýchacích cest použít respirátor v případě, že na pracovišti vznikají páry nebo aerosol
- pro ochranu kůže použít gumové rukavice z nitrilkaučuku a přiléhavý pracovní oděv
- pro ochranu zraku použít ochranné brýle

Další podrobnější údaje jsou uvedeny v Bezpečnostním listu výrobku.



Tento technický list byl vypracován na základě výzkumu a ověřen v praxi. Stálost kvality výrobků je přísně sledována u výrobce. Před používáním je vhodné účinnost výrobku odzkoušet. S jakýmkoliv dotazem týkajícím se výrobku se obraťte na výrobce.

poslední revize 12/2009



KESTON BAZALT

basalt fibre snippets

Properties

KESTON basalt fibre snippets are composed of fine fibres having circular cross-sections and are industrially produced from effusive rock, and this product has been developed for use in the building industry. The lengths of the fibres in KESTON BAZALT are between 12 and 600 mm. Fibre snippets that are distributed homogeneously in concrete, mortar or asphalt mixtures adhere strongly to the binder and work together with well-known additives and auxiliary materials without any detrimental effects. The fibres resist to chemicals: are stable between pH4 and pH13. They indefinitely resist to heat stresses caused by asphalt and bitumen bonded mixtures and improve tolerance against thermal shocks.

The addition of KESTON BAZALT fibre snippets prevents the appearance of shrinkage cracks, facilitates post-treatment and improves structures' capability of resistance against dynamic impacts. They reduce water absorption and penetration of detrimental substances into the material. The fibres improve resistance to frost, wear and melting as well as impact strength. This product improves initial and final compression, bending-tensile and split-bending strengths. The fibres enhance durability, tenacity and service life of the structures and do not conduct electricity. The advantages of the product compared to steel fibres include reduced specific material requirement and weight as well as resistance to corrosion. It is incombustible and can be used between -200°C and +600°C and is UV and alkali resistant.

Field of application

It can be used for the production of any monolithic and prefabricated concrete and reinforced concrete structures. It is recommended for improving properties of other hydraulically-bonded mortars, artificial stones, lime bonded or other composites. Due to its heat resistance properties it can be successfully used also for asphalt and bitumen bonded mixtures. It is suitable for special areas, e.g. to meet special needs of nuclear power industry and electricity industry and to enhance protection against nuclear radiation.

Processing

KESTON BAZALT fibre snippets are added in the factory to a dry mixture or the pre-mixed mortar packaged in bags. In general, 2 kg/m³ should be added to the fresh mixture. Mixing should be carried out until a uniform distribution is achieved, normally for 2 to 4 minutes.

TYPE OF THE FIBRE	FIBRE LENGTH mm	THICKNESS OF MORTAR / CONCRETE LAYER mm	FIBRE ADDITION kg /m ³
KESTON BAZALT	12-600	unlimited from 10 mm	2.0

The minor consistency-impairing effect of the fibre content can be compensated by incorporating plasticizing or liquefying additives. The mixing of fibre snippets can be carried out with every conventional concrete, mortar or asphalt mixer.

Technical features

Appearance	greyish, greenish, black silky fibre snippets
Cutting length	from 12 mm to 600 mm, according to the needs (24, 36, 50, 100)
Fibre diameter	Ø 20 µm
Material density	2,1 g/cm ³
Resistance to water	insoluble, does not undergo hydrolysis
Resistance to chemicals	pH4 to pH13
Permanent heat resistance	+ 982°C
Conductivity	non-conductive, non-magnetizable

Storage

It will retain its quality indefinitely in closed original packaging in a place protected against moisture.

Delivery

600 kg big bag, 25 -5 kg packages

Certificate number: SKO4-ZSV-1945

Sign for ordering

KESTON BAZALT

Storage

6 months from the date of manufacture in closed original packaging in a place protected against moisture

Techno-Wato Kereskedőház Építőipari Kft.
1113. Budapest, Róf u. 9-13., Telefon: 209-2490, Fax: 209-2489
Storage: Tököl – Dunai Repülőgépgyár Ipari Park, Tel.: 06/24-489-204, 06-30-201-1305
E-mail: posta@technowato.hu, web: www.technowato.hu



Health and safety tasks:

The Safety Data Sheet includes the health and safety, environmental and waste management regulations that apply to the product. According to these regulations the levelling discs with and without pins are not considered to be dangerous products and are not subject to labelling. The broken residual pieces must not be discharged into sewers, living waters or the soil, and they must be treated as construction debris.

Remark:

Our recommendations presented to support our customers and users are based on our experience and the latest achievements of science and practice. However, these recommendations cannot be considered as a contractual legal base or a restriction. In every case it is advisable to select the amount of product to be used and the installation method in line with local conditions or a trial assembly can be conducted.

Techno-Wato Kereskedőház Építőipari Kft.

1113. Budapest, Rőf u. 9-13., Telefon: 209-2490, Fax: 209-2489

Storage: Tököl – Dunai Repülőgépgyár Ipari Park, Tel.: 06/24-489-204, 06-30-201-1305

E-mail: posta@technowato.hu, web: www.technowato.hu

